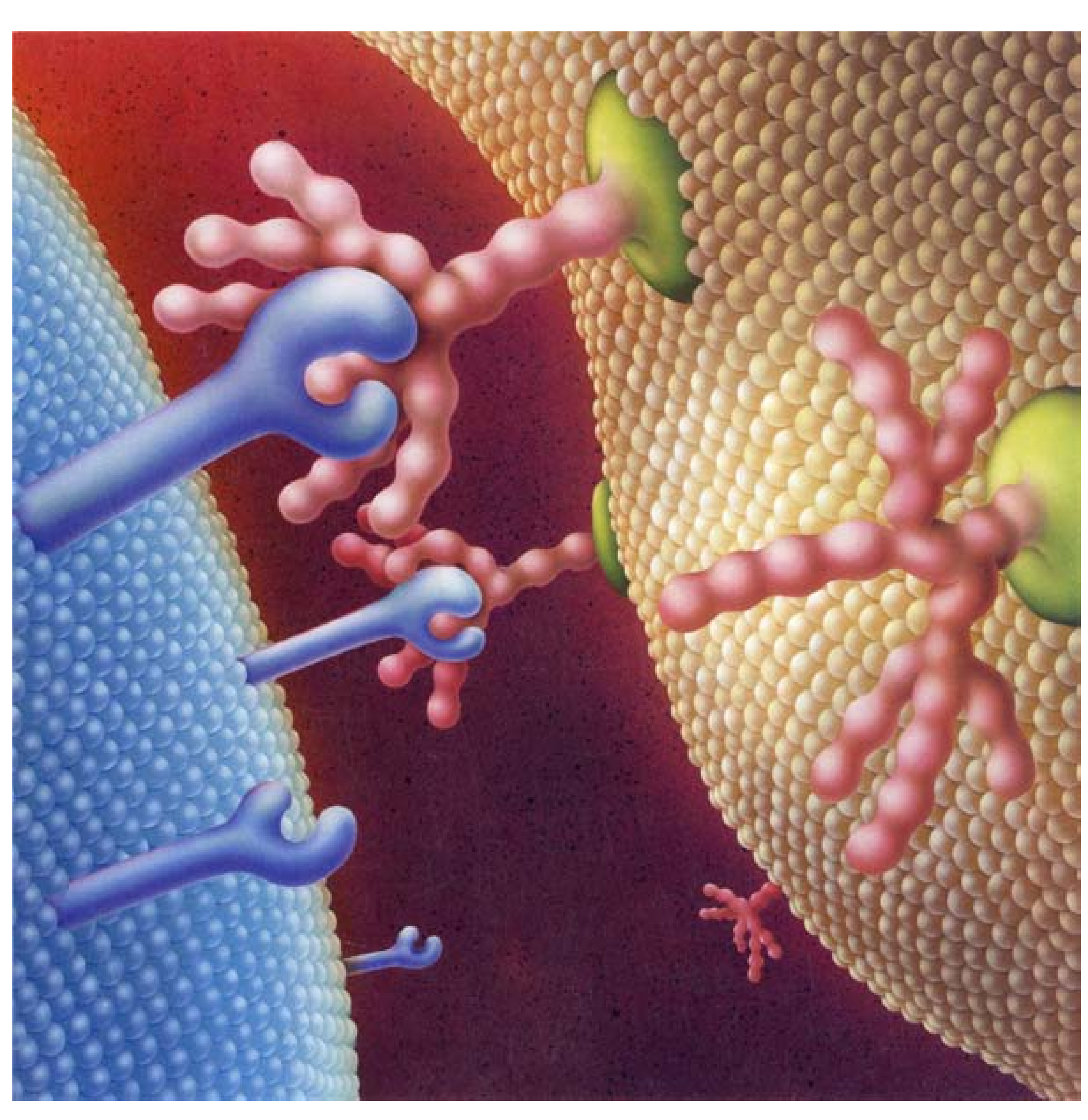
INVESTIGACION y CIENCIA

ORIGEN DE LA VIA LACTEA

PROTOHISTORIA DE LA TIERRA

EL PROYECTO MAIA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



HIDRATOS DE CARBONO

MARZO 1993
700 PTAS.



Marzo de 1993 Número 198



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

A. M. Eff-Darwich Peña y R. A. García Bustínduy: *Así se formó la Vía Láctea*; Esteban Santiago: *Carbohidratos en el reconocimiento celular*; Manuel Puigcerver: *Protohistoria de la Tierra*; Joandomènec Ros: *Lémures de Madagascar*; Ramón Pascual: *Puntos cuánticos*; José M. García de la Mora: *Donald O. Hebb, teórico de la mente;* J. M.ª V. Martínez: *El proyecto Maia*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

Josep E. Llebot, Ramón Pascual, José O'Callaghan, Esteban Santiago, J.-D. Ros y Luis Bou

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

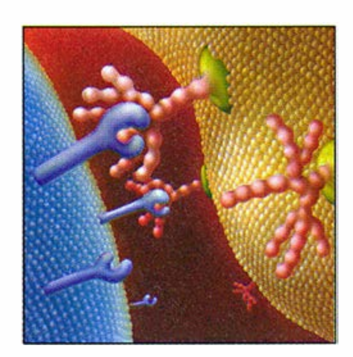
Libros:

Angel Romo, Julio Samsó, Luis Alonso y Ramón Margalef

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Tomo Narashima

Página	Fuente
4-5	JET Join Undertaking
6-10	Silvia Nuere y José A. Tagle
12-13	Alfred Kamajian
14	Michael J. Bolte, Lick Observatory; Johnny Johnson
15	Johnny Johnson (*arriba*), Canada-France-Hawai Telescope Corporation (*abajo*)
16	Sydney van den Bergh (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
17	Alfred Kamajian (*arriba*), Anglo-Australian Telescope Board (*abajo*)
18	Anglo-Australian Telescope Board
20-21	Tomo Narashima
22	Jared Schneidman/JSD
23	Cortesía de Kazuhiko Fujita, Escuela Universitaria de Medicina de Juntendo, Tokio
24	Kathleen Katims/JSD
25	Cortesía de Steven Rosen, Univ. de California, San Francisco
26	Kathleen Katims/JSD (*arriba*), cortesía de Kazuhiko Fujita, Esc. Univ. de Medicina en Juntendo, Tokyo (*abajo*)
27	Photo Researchers, Inc.
40-41	Wayne Fields
42	Johnny Johnson
43	Wayne Fields (*izquierda*), Samuel A. Bowring (*derecha*)
44-46	Ian Worpole
48	Joe LeMonnier
49	David Haring, Duke University Primate Center
50	Frans Lanting/Minden Pictures (*arriba* y *centro*), David Haring (*abajo*)
51	David Haring (*arriba izda.* y *abajo*), Frans Lanting (*arriba dcha.* y *centro*)
52-53	Patricia J. Wynne
54	Joe LeMonnier
55	Frans Lanting (*izda. y dcha.*)
57	Robert Prochnow
58-59	Michael Goodman
60	Mark A. Reed
61	Daniel E. Prober, Univ. de Yale
62-63	Cortesía de Peter M. Milner
64	Gabor Kiss
65	Eric Mose
66-67	Cortesía de Samuel M. Feldman
68-76	LE SCIENZE
82	Andrew Christie
83-84	Johnny Johnson
86-89	Documentos Pour la Science



La figura de la portada representa la adhesión selectiva entre dos células. La unión se realiza por medio de los carbohidratos en una molécula ramificada (*rosa*) que sale de una célula endotelial. Una molécula complementaria, denominada selectina L, situada en la superficie de un linfocito se une específicamente a una subunidad del carbohidrato, encadenando así ambas células. Los carbohidratos determinan muchas de las interacciones entre las células, incluidas las que inician una infección (véase "Carbohidratos en el reconocimiento celular", por Nathan Sharon y Halina Lis en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Buenos Aires, 52, 1.º 3.ª
08036 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... *cincuenta años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según un comunicado presentado por el doctor Bernhard J. Stern en un simposio de Cooper Union dedicado a la 'Medicina en tiempo de guerra', una de las grandes incógnitas de la actual conflagración es si la ciencia moderna será capaz de evitar la aparición de epidemias como las que en todas las guerras pasadas se cobraron más víctimas que los combates. En pocos meses, la epidemia de gripe que siguió a la I Guerra Mundial produjo más bajas que todos los ejércitos en cuatro años. Sólo en Estados Unidos las muertes ascendieron a medio millón, y en el mundo se cree que hubo de diez a veintiún millones. Pero es creencia del doctor Stern que existen elementos de esperanza en el conflicto que hoy aflige al mundo. Desde la última guerra los progresos en epidemiología han sido prodigiosos, y los avances en el terreno de las sulfamidas señalan uno de los capítulos más brillantes de la historia de la medicina.»

«Al cabo de cuarenta y ocho años de haber construido el primer submarino americano a tamaño real capaz de navegar, Simon Lake sigue produciendo tantas ideas nuevas como siempre. Es opinión generalizada que el submarino ha llegado ya al máximo de sus posibilidades; pero Lake, agitando su gris cabellera, declara que semejante buque está sólo en su infancia.»

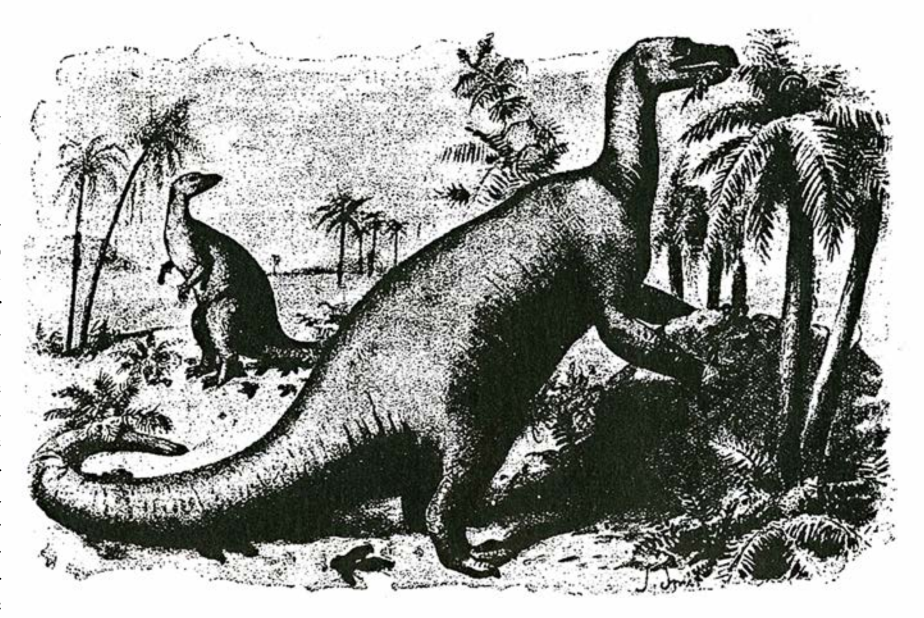
«Los ejemplares de pseudofósiles humanos pueden agruparse en dos clases generales: primero, el individuo 'normal' que, sin embargo, parece más primitivo de lo habitual en su grupo por lo que se refiere a tal o cual rasgo; y, segundo, el individuo que, a causa de un trastorno glandular, ha padecido un engrosamiento de su estructura ósea. El autor puede jurar que durante mucho tiempo codició, sin que el objeto de su codicia lo sospechara, el cráneo de un colega que, por una o dos características, se acercaba al tipo de Neandertal. Vista en conjunto, la cabeza de mi buen amigo no habría inducido a ningún anatómico competente a creerlo perteneciente a alguno de nuestros ancestros más primitivos. Pero si la porción derecha de su cráneo (la parte 'primitiva') se hubiera extraído de algún yacimiento arqueológico de cierta antigüedad, se habría disparado la polémica.»

... *cien años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «'En todos los proyectos para enviar señales a Marte propuestos por los sabios tebanos, no he visto ninguna referencia a algo que al indocto profano le parece la dificultad más patente. La cara iluminada de Marte siempre apunta hacia nosotros. Si de noche y por medios artificiales se enviaran señales desde el lado oscuro de nuestro planeta, los destellos tendrían que ser muy intensos, lo suficiente para que la luz solar allí incidente no impidiese percibirlos. Sin embargo, a Venus podemos verlo de día a raros intervalos. En esas ocasiones podrían enviarse allá destellos mediante espejos. Tales destellos caerían en su cara oscura, y sus habitantes, llegado el caso, los verían durante su noche.'-T. M. Anderson, coronel, U.S.A., cuartel Vancouver.»

«La muerte, acaecida el otro día en una localidad de Norfolk, de un italiano centenario, cuya agitada biografía incluía el servicio en 'la Grande Armée' de Napoleón durante la desastrosa campaña rusa de 1812, atrae nuestra atención hacia lo siguiente: las huestes napolitanas, de 10.000 hombres, soportaron el frío y las privaciones mejor que las otras divisiones, reclutadas éstas en Europa Central y Noroccidental. Se formó una opinión sobre ello, la de que los italianos, nacidos y criados en el soleado sur, conservaban en su constitución tanto 'calórico', que su reserva del mismo aún duraba mucho después de que sus compañeros de climas menos favorecidos las hubieran agotado. En apoyo a esta tesis se invocaba la experiencia de otros italianos que, como profesores o artistas, se habían establecido en centros educativos ingleses o escoceses, y cuya capacidad para resistir el primer invierno septentrional fue mucho mayor que durante el segundo y el tercero; para entonces, se afirmaba, sus reservas de 'calórico' se habían consumido.»

«Fue Cuvier, con su razonar agudo e imaginativo, el inventor de la maravillosa ciencia de la anatomía comparada y la paleontología. Sus extraordinarios conocimientos de los animales y aves existentes le permitían reconstruir a partir de un cráneo o una vértebra, a veces de un solo diente, la extinta criatura, hace tanto desaparecida, en su verdadero aspecto vivo, revistiéndola de carne y piel, mostrándola, con la imaginación, en las guaridas donde moraba y se desenvolvía. Esto, que el barón Cuvier hizo con gráfica descripción de gran belleza científica y literaria, lo ha popularizado ahora Mr Hutchinson en su obra sobre Monstruos Extinguidos, publicada por los señores Chapman & Hall (véase ilustración).»



Iguanodonte

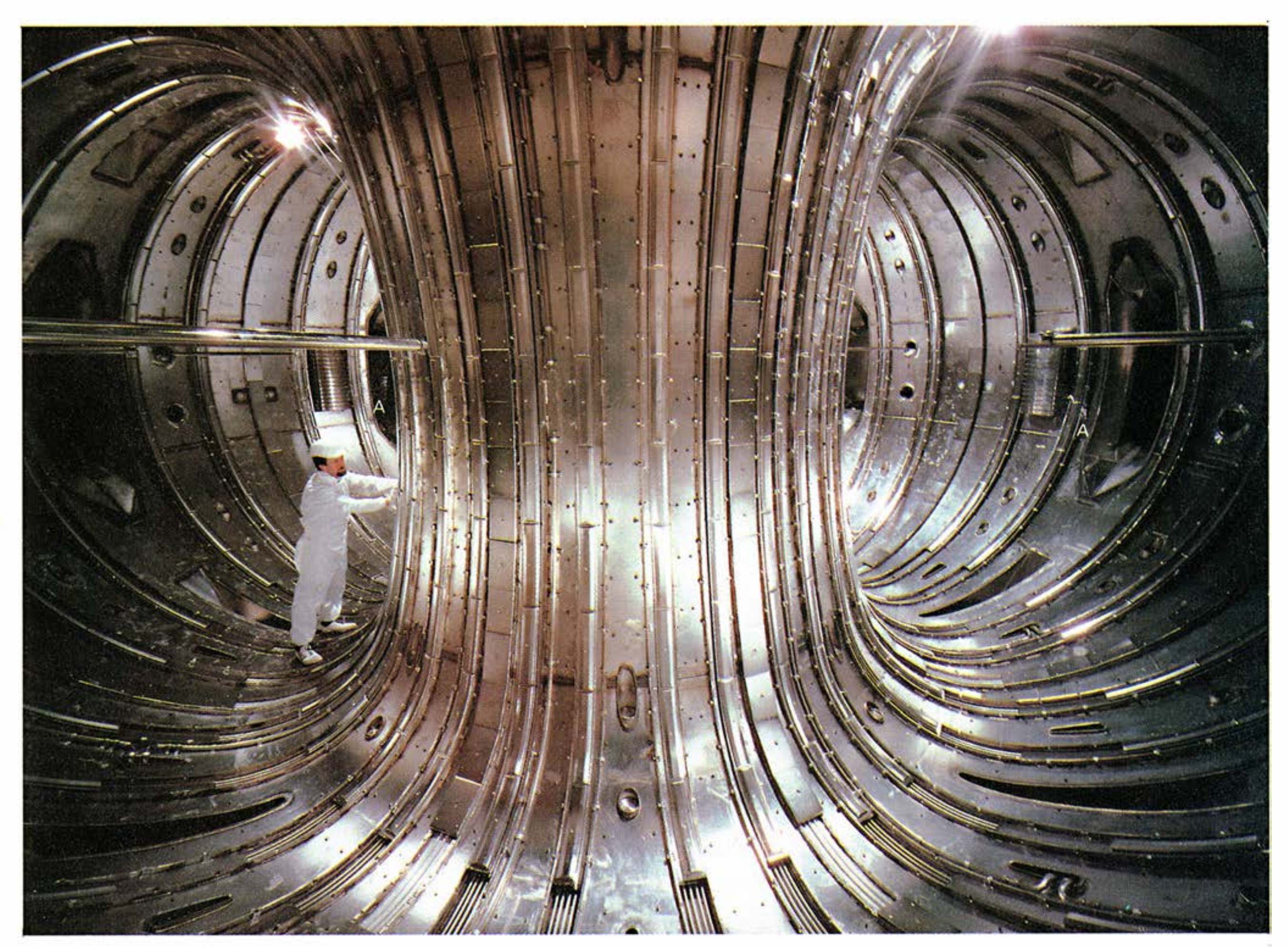
Plasmas limpios

La pureza de un plasma termonuclear es uno de los factores críticos en la obtención de energía de fusión

José Antonio Tagle González

La energía liberada en la fusión de núcleos de átomos ligeros, principalmente de hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), constituye la mayor reserva energética de la humanidad y la mejor alternativa potencial del futuro. Las reservas ilimitadas de su combustible, su fácil disponibilidad, la seguridad intrínseca de un reactor de fusión y la inexistencia de procesamientos de residuos radiactivos a gran escala determinan que la energía de fusión sea, al mismo tiempo, compatible con las máximas condiciones de seguridad, protección del entorno y rentabilidad económica.

La producción controlada de reacciones de fusión, con balance neto de energía, se ha convertido, en las últimas décadas, en una de las aventuras científicas y técnicas más ambiciosas. Y ya, mediante el empleo de campos magnéticos intensos en los dispositivos tokamaks, se han producido plasmas de fusión con temperaturas y densidades similares a las requeridas en un reactor de fusión. En noviembre de 1991, en el tokamak JET de la Comunidad Económica Europea instalado en Culham, Inglaterra, se obtuvieron las primeras cantidades importantes de



1. CAMARA DE VACIO de forma toroidal del tokamak JET en 1983 con superficies internas de inconel-625. El plasma se definía por cuatro limitadores mecánicos de níquel (A) situados en el plano ecuatorial. También se muestran los electrodos utilizados en las descargas en gases para acondicionamiento de las paredes antes de las descargas con plasma. En dicha cámara se obtuvieron plasmas con parámetros a un factor 100 de los requeridos en un reactor de fusión.

energía de fusión (millones de joules) de manera controlada.

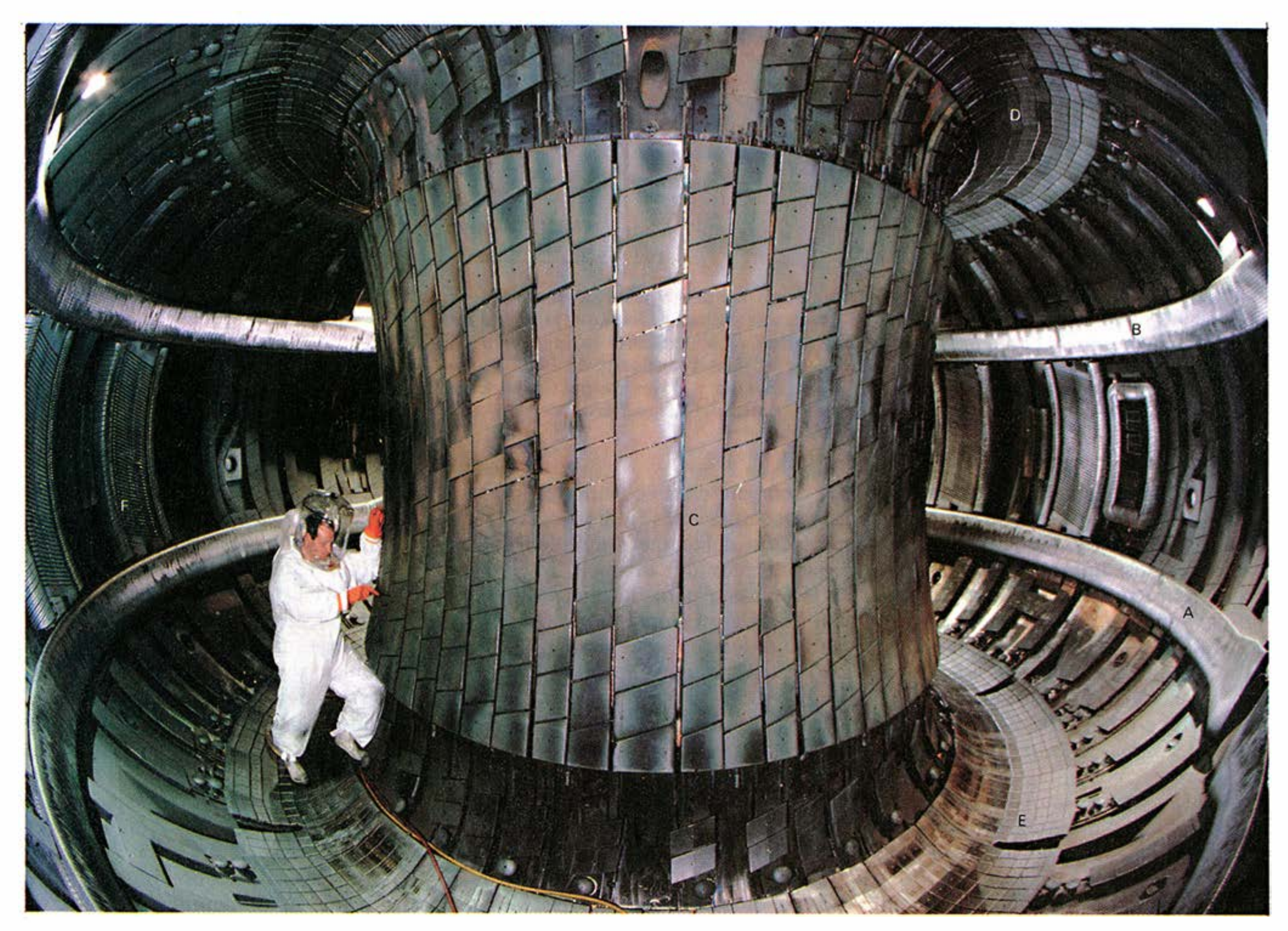
Desgraciadamente, los plasmas de fusión producidos en el JET y otros grandes tokamaks pierden repentinamente sus propiedades termonucleares debido a un enorme flujo de impurezas que penetran en los mismos, procedentes de las paredes del dispositivo que los confina. No sabemos todavía cómo mantener limpio un plasma, reducir al mínimo el influjo de impurezas, ni sabemos controlar la densidad de hidrógeno en el plasma y la composición del mismo, y está por averiguar si alcanzaremos la capacidad técnica suficiente para extraer el helio quemado en las reacciones de fusión. Todas estas cuestiones están condicionadas, en buena medida, por la interacción del plasma caliente con las paredes del dispositivo que lo contiene y se amparan bajo el epígrafe general de "interacción plasma-superficie y control de impurezas".

El sistema de control de impurezas constituye actualmente la pieza clave en el diseño de la próxima generación de dispositivos de fusión que operarán en forma de reactores experimentales. Si se consigue crear y mantener plasmas limpios se habrá dado un salto cualitativo importante para la obtención de plasmas de fusión encendidos con producción de energía eléctrica en las próximas décadas.

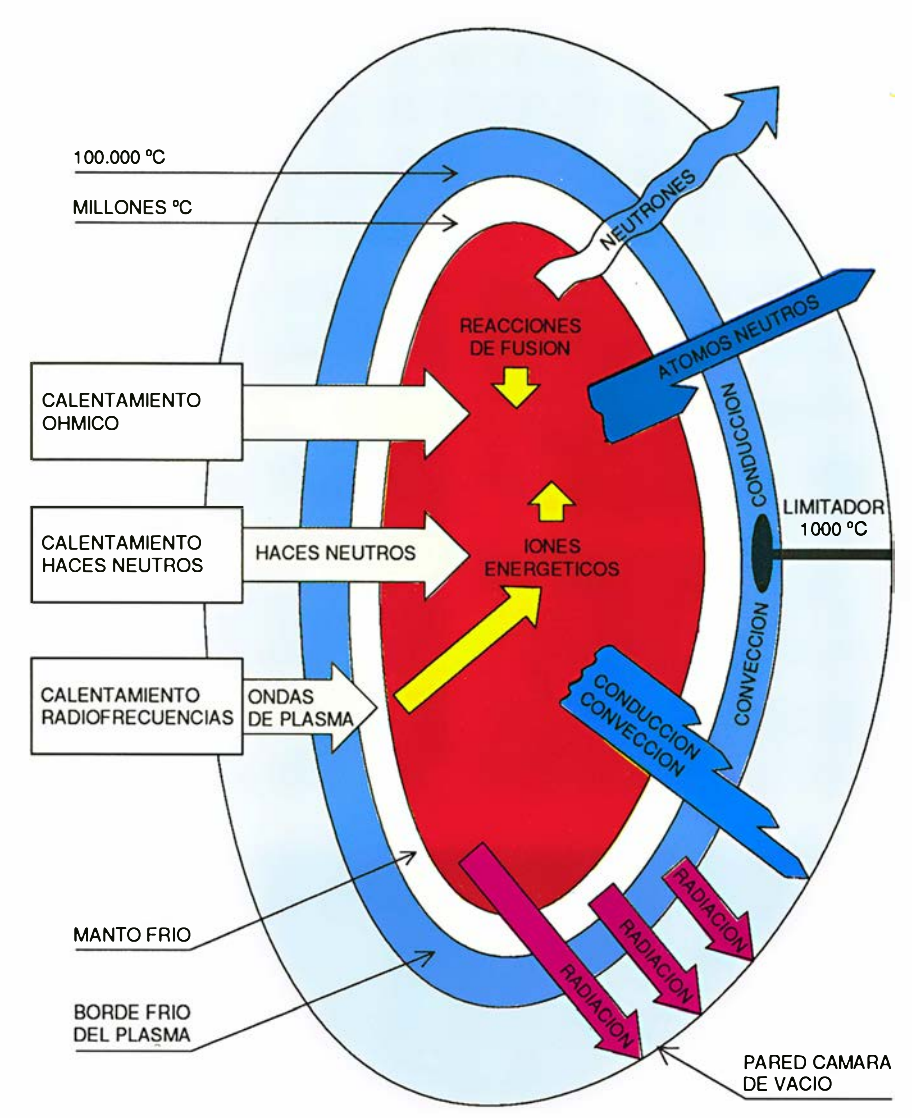
JOSE A. TAGLE ha sido responsable de los diagnósticos de plasma-pared en el tokamak JET desde 1983. Doctor en ciencias físicas por la Universidad Autónoma de Madrid (1980) en la especialidad de física de superficies (estado sólido), ha realizado trabajos de investigación en los laboratorios de Oak Ridge (Estados Unidos) y Jülich (Alemania), habiendo formado parte del grupo de diseño del sistema de control de impurezas de los futuros tokamaks NET/ITER (Munich, Alemania). En la actualidad es investigador de la empresa eléctrica española IBERDROLA en Madrid.

Conviene empezar por saber a qué llamamos plasmas limpios y qué es una impureza. De todas las reacciones posibles de fusión la más viable en el laboratorio es la que se produce al unir los núcleos de dos isótopos de hidrógeno: deuterio (componente del agua pesada) y tritio. Al fusionarse estos núcleos, se crea otro elemento, helio, y se libera un neutrón, cuya energía se puede transformar en energía térmica y eléctrica. Para que se produzca la fusión de dos núcleos, éstos han de perder previamente los electrones que los rodean y acercarse a sus distancias nucleares: el gas que forma el combustible de las reacciones debe estar ionizado. Llamamos plasma al gas ionizado e impurezas a los elementos atómicos que no forman parte del componente primario del plasma. No hay plasmas puros en la realidad (de hidrógeno, de níquel, de tungsteno u otros); un plasma real está siempre compuesto por varios elementos: el principal y los secundarios, o impurezas.

¿Cómo medir y controlar la pureza



2. CAMARA DE VACIO reformada del tokamak JET en 1992 para un control mejor de impurezas. El plasma está limitado en su parte externa por dos limitadores toroidales, berilio (A) y carbono (B), en su parte interna (C) por las superficies de inconel recubiertas de plaquetas de grafito, en su parte superior por grafito (D) y en su parte inferior por berilio (E). Se pueden observar ocho antenas de radiofrecuencias distribuidas toroidalmente (F). Se obtuvieron plasmas casi limpios.



3. ESQUEMA TRANSVERSAL de un tokamak con los principales procesos físicos que intervienen en un plasma de fusión. El plasma se calienta mediante la corriente inducida en el mismo por un transformador (óhmico) o mediante la inyección de átomos neutros muy energéticos o radiofrecuencias. Las reacciones de fusión producen neutrones de millones de electronvolts de energía y flujos de partículas cargadas que bombardean de forma continua las paredes del dispositivo.

de un plasma? Conforme aumenta la temperatura del plasma, crece el número de electrones que se separan del núcleo de los átomos que lo componen; y pueden alcanzarse temperaturas suficientemente altas, varios millones de grados, a las cuales el plasma se halle totalmente ionizado. En dichas condiciones se cumple el principio de cuasineutralidad de carga: la densidad de cargas negativas o electrones es igual, por unidad de volumen, a la densidad de cargas positivas o iones. En un plasma real, con cierto grado de ionización, podemos definir una carga iónica efectiva (Zeff), o promediada, que represente el grado de ionización de cada uno de los elementos atómicos presentes en dicho fluido. La carga iónica efectiva del plasma tenderá a coincidir a altas temperaturas, cuando el plasma se encuentra más ionizado, con un promedio del número atómico de los componentes del mismo.

Un plasma puro, idealmente limpio, que estuviese compuesto de átomos de un solo elemento y totalmente ionizado, tendría una carga iónica efectiva (Zeff) igual al número atómico de dicho elemento. En nuestro caso, un plasma de fusión termonuclear, cuyo combustible fuese sólo hidrógeno o sus isótopos y estuviese completamente limpio, tendría una Zeff igual a uno. Pero en la realidad los plasmas limpios son difíciles de conseguir, y no hay manera de evitar las impurezas. ¿De dónde proceden éstas?

Para contestar a esta pregunta hemos de conocer la naturaleza de la interacción entre el plasma y las paredes del dispositivo que lo confina. La fusión de dos núcleos exige que éstos, al poseer carga del mismo signo (positiva), venzan la fuerza de repulsión coulombiana, para lo cual deben colisionar a grandes energías cinéticas; es decir, hay que calentar el plasma a temperaturas de centenares de millones de grados. A esas temperaturas, el plasma necesita estar confinado en un recipiente un tiempo mínimo para que las reacciones de fusión se produzcan en número suficiente y resulte un balance neto de energía. El método de confinamiento de un plasma termonuclear más desarrollado en la actualidad se basa en confinar dicho plasma en una cámara de vacío con forma toroidal (buñuelo o rueda), empleando campos magnéticos intensos creados alrededor de la misma.

Entre los esquemas de confinamiento magnético sobresale el denominado "tokamak". El plasma contenido en la cámara de vacío se calienta a las temperaturas de fusión, bien por el paso de una corriente inducida en el mismo por un transformador (calentamiento óhmico) o mediante la energía transferida por haces atómicos neutros u ondas de radiofrecuencias que se inyectan en el mismo. La combinación de los diversos campos magnéticos creados hace que las líneas de campo tengan forma de hélice a lo largo de las cuales se mueven las partículas del plasma. Así quedan atrapadas, o confinadas en la cámara de vacío. Sin embargo, el confinamiento no es perfecto, y muchas partículas escapan del plasma caliente central; lo cual hace que las paredes del dispositivo se hallen sometidas a intensos flujos de partículas y energía (radiación, convección, conducción, etc.). Las partículas cargadas abandonan el plasma por transporte perpendicular a las líneas de campo, o cuando estas líneas son intersectadas por las paredes del toro u otros materiales colocados dentro del plasma. La distribución espacial de estos flujos de partículas y energía sobre las paredes está determinada por procesos bastante complejos, de los que conocemos muy poco todavía: geometría de los campos y superficies magnéticas, propiedades de transporte del plasma, diseño de las componentes del dispositivo y otros.

Las impurezas contaminantes se producen fundamentalmente en el "borde del plasma", zona o región bastante indeterminada que une el plasma central con las paredes de la cámara de vacío. Las partículas car-

gadas que abandonan el plasma, una vez que llegan al borde del mismo, interaccionan con las superficies de las paredes o limitadores a través de complicados procesos. Los iones calientes que escapan del plasma (H^+, D^+, T^+,..) al interaccionar con los dispositivos protectores de la pared (limitadores), o en su defecto directamente sobre la pared, son neutralizados y reinyectados en el plasma. No obstante, en dicha interacción también pueden erosionar la pared mediante la pulverización física o química de los materiales de ésta y pueden desorber moléculas o átomos de compuestos débilmente ligados a la superficie del material (hidrocarburos residuales, agua, etc.) produciendo átomos, moléculas o iones de elementos diferentes a los del plasma original, es decir, "impurezas".

Algunos de dichos iones (plasma e impurezas), así como los átomos neutralizados, tornan al plasma, donde aproximadamente el 60 % de los átomos neutros vuelven a ser ionizados, mientras que el resto de los iones, después de diversos tipos de colisiones y excitaciones atómicas, escapan del plasma e interaccionan con la pared a energías más altas. El proceso se itera: algunos reingresan en el plasma y otros penetran en el interior del material de la primera pared, donde pueden ser atrapados según su rango de energía y los defectos de la red del material.

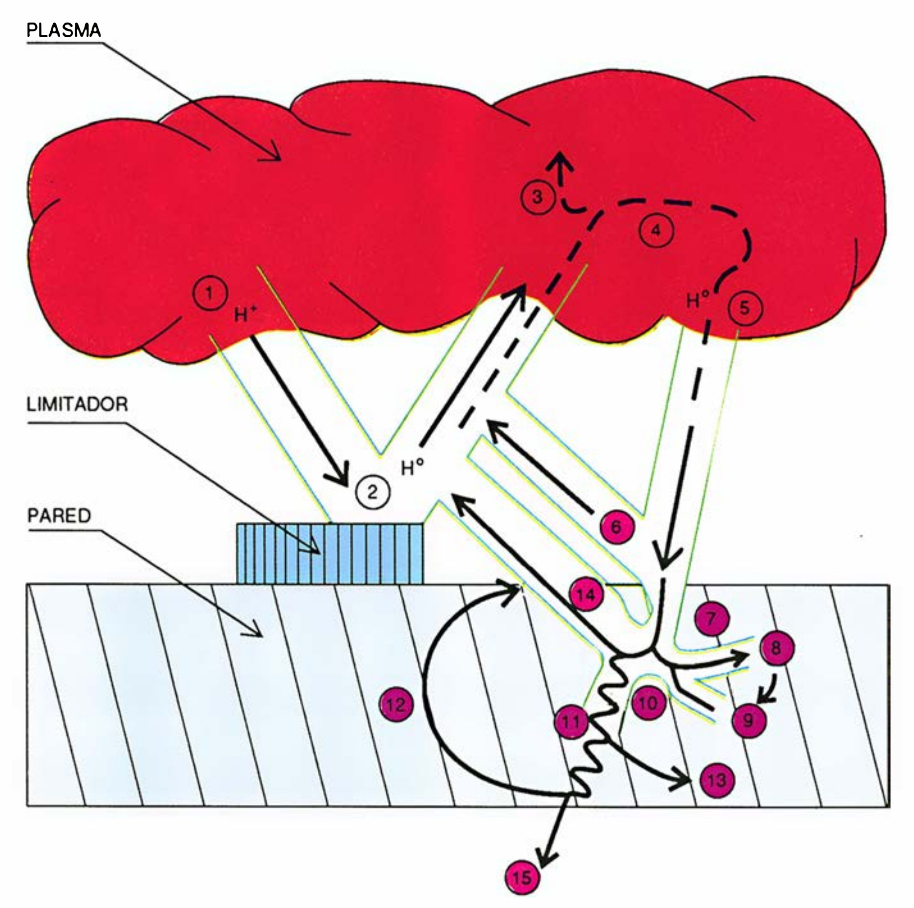
Los iones atrapados pueden provocar la liberación de iones retenidos anteriormente en el material; éstos, a su vez, pueden: *a*) difundirse dentro del material y acabar por propagarse a la superficie en contacto con el plasma y volver al mismo, *b*) quedar atrapados en el volumen del material o *c*) difundirse al exterior del toro atravesando la primera pared.

El estudio pormenorizado de cada uno de estos procesos se ha llevado a cabo en experimentos con plasmas de laboratorio, donde se simulaba la interacción de un plasma periférico con diversos materiales. Tambien se han estudiado estos procesos *in situ*, en dispositivos de fusión, mediante la medida de los parámetros del borde del plasma y el análisis de muestras expuestas a plasmas de fusión con técnicas de física de superficies.

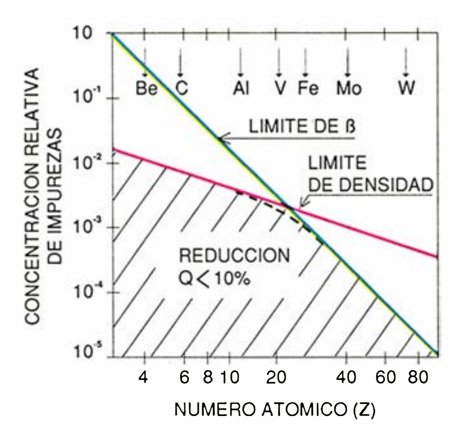
Una vez que la impureza ha sido creada y se introduce en el plasma, hemos de preguntarnos ¿cómo afecta aquélla a éste? Las impurezas alteran de un modo u otro la mayoría de las propiedades del plasma: procesos de colisión coulombiana, pérdidas de energía por radiación, resistividad del plasma, distribución de la densidad de corriente y los campos magnéticos, transporte de partículas y energía, tiempo de confinamiento de la energía, densidad de iones en el plasma, densidad de potencia de las reacciones de fusión, etc. Pero el principal problema que las impurezas crean en un plasma de fusión estriba en la drástica reducción del factor de ganancia energética del dispositivo de fusión (Q). La ganancia Q denota el cociente entre la potencia generada y la consumida. Un reactor de fusión ha de conseguir, evidentemente, una producción neta de energía, es decir, el valor de Q tiene que ser mucho mayor que la unidad. ¿En qué forma las impurezas rebajan el valor de Q?

Cuando un átomo entra en un plasma caliente se ioniza. En ese estado de excitación, empieza a emitir radiación; es el plasma entero el que comienza a radiar, perdiendo energía y enfriándose. En última instancia, las impurezas enfrían el plasma. Al hablar de la viabilidad técnica y económica de un reactor, importa conocer el parámetro beta del plasma: relación entre su presión cinética y la presión magnética ejercida por los campos que lo confinan. La presión magnética está relacionada con la intensidad de los campos magnéticos confinantes y con las dimensiones de las bobinas magnéticas, con el "coste" del reactor.

En un reactor de fusión el parámetro beta (relación energía producida/coste) debe optimizarse para que sea rentable. Los estudios muestran que el valor mínimo de la beta del plasma, compatible con la tecnología actual de bobinas magnéticas y cámaras de vacío a altas presiones y con una reducción del valor Q menor del 10 %, debe ser al menos del 5 %. El enfriamiento del plasma debido a las impurezas produce una reducción de la presión cinética del mismo y, por tanto, del factor beta. La reducción de la beta es mayor en el caso de presencia de impurezas de átomos pesados, pues al no estar éstas totalmente ionizadas por el plasma, emiten radiación de niveles atómicos más altos y la pérdida de energía por radiación es, pues, mayor. A modo de ejemplo, para un tokamak experimental diseñado con un valor de ganancia energética Q = 2,5, la



4. PROCESOS DE INTERACCION entre el plasma y la pared de un dispositivo de fusión. Las partículas que escapan del plasma pueden neutralizarse en las superficies en contacto con el mismo y volver al plasma, atraparse en el material de la primera pared, arrancar partículas de la misma que se introducen en el plasma o difundirse.



5. EFECTO DE LAS IMPUREZAS en la reducción de la ganancia energética (Q) de un plasma. Una concentración excesiva de impurezas ligeras (número atómico Z 14) produce una dilución grande del combustible y un límite en la densidad. Una concentración alta de impurezas pesadas (Z 16) hace que el plasma se enfríe al perder mucha energía por radiación, produciendo un límite a la potencia de fusión generada (parámetro beta).

sola presencia de una concentración del 0,5 % de hierro reduciría este valor en un 60 % (Q = 1,5).

El segundo efecto drástico de las impurezas tiene que ver con la dilución de combustible. Puesto que el plasma mantiene globalmente la neutralidad de carga, la presencia de iones de impurezas determinaría que la densidad de iones de combustible (deuterio y tritio) fuera menor para una densidad de electrones fija. El combustible se diluye. Ahora bien, la energía neta de las reacciones de fusión depende del número de núcleos reaccionantes (densidad de deuterio y tritio); por consiguiente, la presencia de impurezas reduciría de nuevo la ganancia energética de la reacción. Debido a problemas de estabilidad del plasma, la densidad del mismo no se puede aumentar impunemente y existe un límite empírico a la misma, con lo cual es necesario reducir el número de impurezas compatible con este límite de densidad. Las impurezas de elementos ligeros suelen estar totalmente ionizadas en plasmas de fusión; así pues, su penetración en el centro del mismo es mayor y son en este caso las que más contribuyen a la dilución del combustible.

¿Cómo se controlan las impurezas? Si éstas se originan en la interacción del borde del plasma con las superficies del dispositivo de fusión, lo mismo su producción que su posterior control estarán gobernados por el estado de dichas superficies y las propiedades del plasma periférico (densidad y temperatura principalmente). El control de impurezas cubre dos tareas: evitar que se produzcan (o al menos reducir esa producción al mínimo) y, una vez producidas, impedir que entren en el plasma principal y lo contaminen. Mientras que la primera tarea guarda relación con la ciencia de materiales y superficies, la segunda se basa en el conocimiento de las propiedades del borde del plasma confinado magnéticamente y en particular del plasma periférico.

Los dos problemas centrales que han de abordarse en el ámbito de la primera tarea son el acondicionamiento de la pared y la selección de los materiales que estarán en contacto con el plasma. Los materiales de la primera pared de la cámara de vacío que contiene el plasma suelen ser metales compatibles con condiciones de ultraaltovacío (aceros inoxidables, inconeles, aleaciones de níquel, etc.). La reducción de impurezas comienza con la propia limpieza de las superficies de los materiales antes de introducir el gas del plasma en el dispositivo. Junto a técnicas clásicas para la obtención de ultraaltovacío (calentamiento y desgasificación de las paredes) se han desarrollado diversos tipos de descargas en gases, pulsadas o asistidas por radiofrecuencias, que al producir un bombardeo continuo de las paredes eliminan los gases residuales u óxidos débilmente ligados en las mismas.

El tokamak JET es el único diseñado con capacidad de operar con paredes calientes (300–400º), lo que posibilita una buena eliminación del oxígeno e hidrocarburos residuales en las paredes. En los tokamaks que operan a temperaturas de las paredes más bajas (25–100º) se han utilizado técnicas de evaporación de láminas metálicas sobre las superficies de la primera pared (berilio, titanio, cromo), creándose unas superficies metálicas muy limpias con una notable capacidad de bombeo de los gases residuales (efecto "getter") y la formación de compuestos con dichos gases; los compuestos poseen una mayor energía de ligadura a la superficie y son, por tanto, más resistentes a una posterior evaporación o erosión por el plasma.

Si la limpieza o acondicionamiento de las superficies de las paredes del dispositivo constituye el primer paso para reducir las impurezas, la selección de los materiales de las componentes en contacto con el plasma reviste uno de los desafíos más serios con los que se enfrenta hoy el programa de fusión. Los materiales deben combinar buenas propiedades térmicas y mecánicas (alta temperatura de fusión, buena conductividad térmica y resistencia a pulsos térmicos) con las propiedades deseables para un buen funcionamiento del plasma (bajo número atómico, bajo coeficiente de pulverización y buena porosidad). En experimentos llevados a cabo en dispositivos que utilizaban materiales metálicos como elementos de la primera pared o en contacto con el plasma (aceros, inconeles, carburos de titanio y molibdeno), se observó que la mayor parte de la energía perdida por el plasma se debía a la radiación de las impurezas metálicas provenientes de dichas superficies; no se pudo, pues, obtener en ellos plasmas de alta corriente y con alta potencia inyectada. Un rendimiento mejor se logró, por contra, con materiales de bajo número atómico, si bien éstos quedan limitados a diversos tipos de grafito y berilio, y posiblemente alguna mezcla de los mismos con litio y boro.

Pero el flujo de partículas y energía incidente sobre las paredes del dispositivo es tan grande, i.e. varios millones de watts por metro cuadrado, que el acondicionamiento de las mismas o la selección de materiales no es suficiente para controlar el influjo de impurezas y mantener el plasma limpio. Se necesita reducir la interacción del plasma con las paredes; dicho de otro modo, para controlar las impurezas hay que imponer una "limitación" espacial al plasma, operación que se realiza mediante unos dispositivos llamados limitadores, cuyos esquemas básicos se reducen a dos fundamentalmente.

El sistema más sencillo, denominado limitador mecánico, consiste en introducir un objeto material entre el plasma y la pared. Con el adecuado diseño geométrico del mismo, se puede conseguir que el área de contacto del plasma con la superficie del limitador sea mínima; aunque esta área de contacto sea una fuente local muy grande de impurezas, al estar la pared desacoplada del plasma central, permite que el plasma permanezca "globalmente" más limpio. Eligiendo la forma adecuada del limitador (cerrado o abierto), podemos bombear hacia el exterior el plasma periférico, que es el más contaminado. La última superficie magnética cerrada será la tangente a la superficie del limitador, las partículas que se encuentren en superficies magnéticas más externas pueden fluir a lo largo de las líneas de campo en el borde del plasma y ser bombeadas fuera del dispositivo.

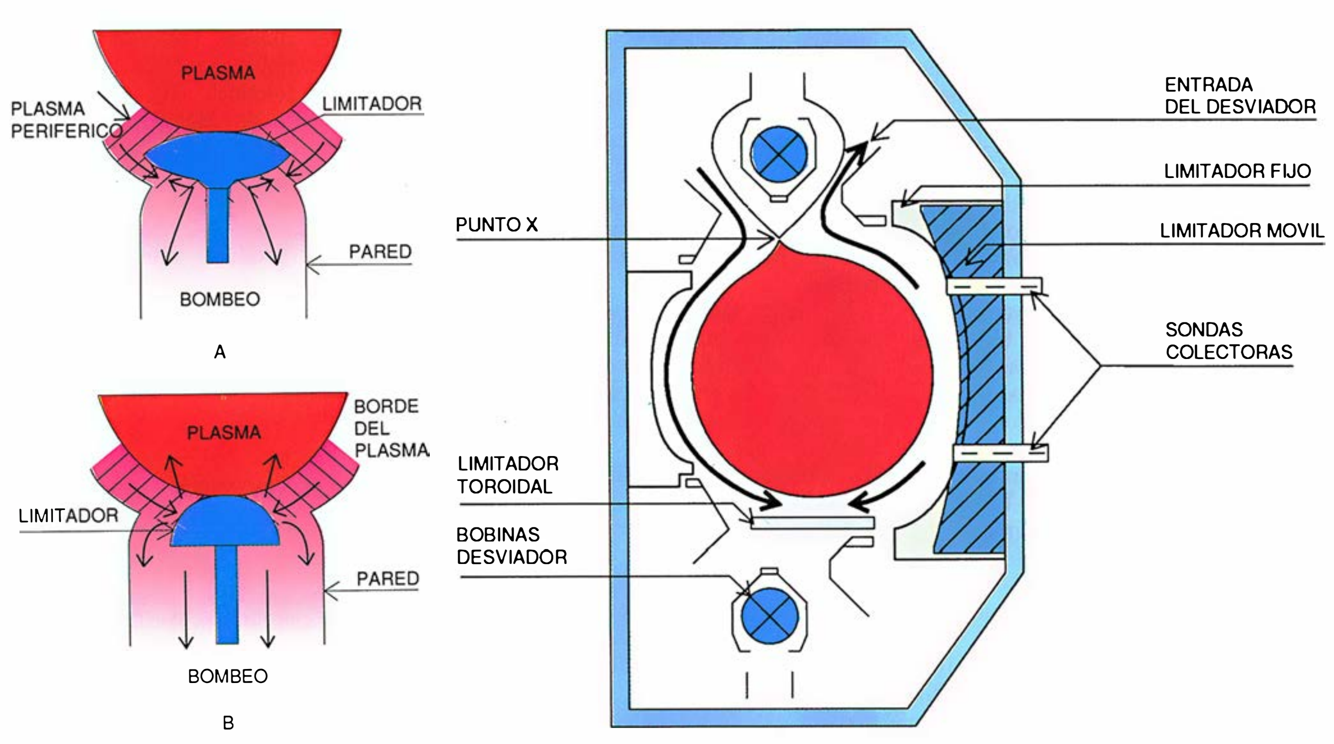
El segundo sistema, denominado limitador magnético o desviador, se basa en la instalación de unas bobinas magnéticas adicionales, alrededor de la cámara de vacío, las cuales hacen que la última superficie magnética cerrada tenga un valor nulo del campo magnético en un punto (punto X). De esta manera, el plasma periférico se desvía magnéticamente hacia una cámara de vacío auxiliar, donde se produce la fuerte interacción plasma-superficie; el plasma sucio que hay en dicha cámara queda aislado del plasma principal de la cámara central. En este caso, la región de interacción del plasma con los materiales de la pared se halla más difusa, pero el plasma sucio queda también más desacoplado del plasma principal.

Contamos, por último, con un sistema de control de impurezas basado en el control de las propiedades del plasma periférico. La producción de impurezas depende de la energía de las partículas que inciden sobre los materiales de la primera pared. Esta energía, a su vez, depende de la temperatura de los electrones y iones del plasma periférico; para cada tipo de ion y material, la temperatura determina el coeficiente de pulverización de dicho material (número de partículas arrancadas de la superficie por partícula incidente). Si pudiéramos crear un manto frío en la periferia del plasma, es decir, un plasma de baja temperatura y alta densidad, bajaría, además de la producción de impurezas (a menor temperatura menor coeficiente de pulverización), la probabilidad de las partículas del borde (iones del plasma o impurezas) de volver a entrar en el plasma, dado que el plasma denso apantallaría el plasma central. El concepto de manto frío ha sido objeto de estudio experimental en diversos dispositivos de fusión en los últimos años mediante las técnicas de inyección de gas frío en el borde del plasma. La principal dificultad de estos métodos (métodos activos de control de impurezas) es conseguir una buena estabilidad térmica de los plasmas muy fríos y densos compatible con la estabilidad global del plasma central.

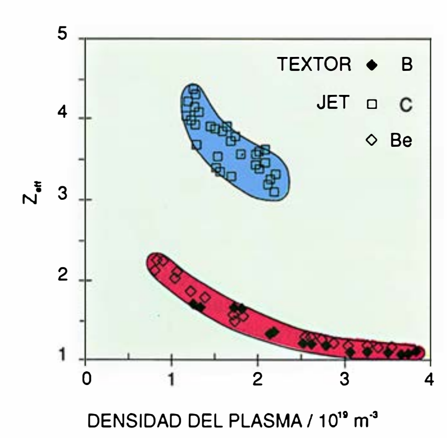
Otro método activo de control de impurezas pretende retenerlas en el borde del plasma. Gracias a ello, la mayor pérdida de potencia por radiación del plasma ocurriría en la zona periférica, lo que comporta el enfriamiento del mismo en esa región y una reducción de la potencia depositada sobre los materiales y de la creación de impurezas. La retención de impurezas cerca del desviador o limitador depende del balance de fuerzas que actúan sobre las partículas y los iones de impurezas; para ello habría que inducir, en principio, un flujo grande de partículas neutras en la dirección del desviador y aumentar las fuerzas de fricción sobre las impurezas, reteniéndolas y no dejándolas escapar de la zona del borde del plasma. Durante los próximos años, estos experimentos de física del borde centrarán las investigaciones en los desviadores avanzados de bombeo de los grandes tokamaks.

¿Cuáles han sido los resultados recientes en el control de impurezas? En los años 1983 y 1984 empezaron a funcionar los grandes tokamaks: TFTR (Princeton, Estados Unidos), JET (Culham, Inglaterra) y JT-60 (Naka, Japón). Se quería con ellos crear plasmas en las condiciones necesarias para un reactor de fusión, con la meta puesta en demostrar, a principios de la década de los noventa, la viabilidad científica de la fusión controlada. Dichos dispositivos, equipados con limitadores mecánicos (JET y TFTR) o magnéticos (JT-0), tenían superficies metálicas como materiales de la primera pared.

Durante su primera fase de operación con calentamiento óhmico del plasma, se vio que la mayor parte de la potencia inyectada en el mismo (60 %) se perdía por radiación debida a las impurezas metálicas. En el JET se midieron concentraciones de



6. SISTEMAS DE CONTROL DE IMPUREZAS: limitadores mecánicos y limitadores magnéticos o desviadores. Los primeros, ya abiertos o cerrados, desacoplan el plasma central de la pared y permiten bombear el plasma periférico, que contiene el mayor número de impurezas, fuera del dispositivo. Los limitadores magnéticos desvían el plasma periférico hacia una cámara auxiliar donde se produce la interacción del plasma con la pared y se bombea el plasma sucio.



7. EFECTOS de los materiales de la primera pared o limitadores en la pureza del plasma, medida mediante la carga iónica efectiva Zeff (plasma limpio Zeff = 1), en los tokamaks JET y TEXTOR. A densidades del plasma altas el borde se hace más denso y frío, impidiendo la entrada de impurezas en el centro y aumentando su limpieza.

impurezas del 0,2 % de níquel, 0,02 % de cromo, 0,03 % de molibdeno, 2,0 % de carbono y un 0,5 % de oxígeno. El valor de la carga iónica efectiva típico era Zeff = 2-3, es decir, el plasma estaba casi tres veces más sucio que un plasma idealmente limpio. Era necesario recurrir a materiales de la primera pared de número atómico mas bajo.

Los experimentos llevados a cabo en el tokamak alemán TEXTOR mostraron que, si las paredes se recubrían de una capa de carbono, las propiedades del plasma mejoraban sustancialmente. En los años siguientes (1985-1989), las paredes de los grandes tokamaks se cubrieron de grafito en sus zonas de contacto con el plasma. Hasta 1989 el tokamak JET funcionó con limitadores toroidales de grafito y con grandes áreas de la primera pared recubiertas bien con placas de grafito o por capas de carbono depositadas sobre las paredes originales de inconel.

Con la utilización del grafito, los parámetros del plasma aumentaron drásticamente en el JET y TFTR; se produjeron temperaturas iónicas del plasma de 300 millones de grados, superiores a las requeridas en un reactor de fusión. No obstante, los plasmas seguían teniendo una concentración excesiva de carbono (3 %) y oxígeno (1 %), aunque la concentración de impurezas metálicas había desaparecido excepto en el caso del calentamiento de plasmas con radiofrecuencias, en que el níquel, vaporizado de las pantallas de Faraday de las antenas de radiofrecuencias por impacto de los iones supraenergéticos acelerados por los campos eléctricos, adquiría valores inadmisibles.

Por aquellas fechas se demostró la viabilidad de operar el tokamak JET con limitadores magnéticos. Se creó una configuración de punto X en las partes superior e inferior de la cámara de vacío, observándose que el tiempo de confinamiento de la energía del plasma era casi el doble del obtenido en plasmas limitados mecánicamente. Puesto que el diseño original del JET no incluía una cámara auxiliar del desviador, fue necesario proteger las zonas del punto X (superior e inferior de la cámara) con plaquetas auxiliares de grafito.

Mas el grafito no era la solución última. Presentaba serios problemas: retenía mucho hidrógeno y deuterio, que se desprendían de las paredes de manera incontrolada durante las descargas del plasma, impidiendo así un control eficiente de la densidad del mismo; la alta concentración de carbono y oxígeno en el plasma diluía hasta un 40 % el combustible, y la formación de zonas calientes locales en las superficies de grafito producía grandes flujos de carbono en el plasma, con el drástico deterioro de sus propiedades termonucleares.

Desde 1989 se ha tratado de controlar las impurezas en el plasma en los tokamaks mediante el empleo de materiales con gran capacidad de bombeo del oxígeno y la eliminación del carbono: berilio y boro. Muchos tokamaks han optado por la técnica de evaporación de boro sobre las paredes y han obtenido plasmas prácticamente limpios a altas densidades; el JET, por su parte, basó su camino hacia la producción masiva de energía de fusión en la utilización del berilio.

El berilio había demostrado su idoneidad como material de primera pared en tokamaks pequeños (ISX-B, UNITOR). Su introducción en el JET se produjo en dos fases diferentes: se comenzó por evaporar berilio sobre los limitadores de grafito ya existentes, utilizando cuatro evaporadores distribuidos toroidalmente de manera uniforme. El grosor de las capas, entre 150 y 1000 angstroms, sobrevivía a unas decenas de descargas. A finales de 1989 se sustituyeron los limitadores toroidales de grafito por limitadores de berilio, pero se mantuvo el grafito en la pared interna y en las zonas del punto X.

La utilización del berilio en el JET mejoró radicalmente la calidad del plasma hasta alcanzar condiciones próximas al balance unitario de energía (Q = 0,8). El berilio bombeó el oxígeno y lo eliminó prácticamente como impureza en el plasma, redujo en un factor dos la concentración de carbono y permitió mejorar el control de la densidad del plasma; además, desapareció la producción de níquel durante el calentamiento con radiofrecuencias al recubrirse de berilio las antenas, la densidad del plasma se incrementó en un 60 % y la potencia del plasma perdida por radiación disminuyó a un 30 %, obteniéndose plasmas bastante limpios con un calentamiento por radiofrecuencias de hasta 30 millones de watts. A pesar de todo, el carbono seguía siendo la impureza dominante, ya que, por dificultades técnicas, permanecían recubiertas de grafito zonas extensas de la primera pared.

En la actualidad se han obtenido de forma transitoria, algunos segundos, plasmas prácticamente limpios (Zeff = 1) mediante todas las técnicas descritas más arriba. Dicho progreso espectacular ha requerido no sólo un cambio de los materiales de la primera pared (i.e., el JET comenzó con paredes de inconel, pasando por limitadores de grafito y posteriormente de berilio), sino también la operación del dispositivo de plasmas limitados mecánicamente a plasmas limitados magnéticamente (descargas con punto X en el JET). Dichos avances en el control de la pureza del plasma hicieron posible que en noviembre de 1991 se produjeran en el tokamak JET dos millones de joules de energía de fusión de manera controlada. Cómo mantener limpios plasmas encendidos de fusión durante períodos estacionarios o semicontinuos (1-2 horas) y ser capaces de producir energía en el rango de miles de millones de joules (gigajoules) es quizá la principal dificultad con la que se habrá de enfrentar la fusión nuclear en las próximas décadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROGRESOS HACIA UN REACTOR DE FUSION TOKAMAK. H. P. Furth, *Investigación y Ciencia*, octubre de 1979, págs. 18-31.

PHYSICS OF PLASMA-WALL INTERACTIONS IN CONTROLLED FUSION. Por D. E. Post y R. Behrisch, Plenum Press, 1984

EFFECT OF THE EDGE TEMPERATURE ON IMPURITY PRODUCTION UNDER A RANGE OF OPERATING CONDITIONS IN JET. J. A. Tagle *et al.*, *Europhysics Conference Abstracts* vol.11 D, parte II, págs. 662-675, 1987.

COMPARISON OF BERYLLIUM AND GRAPHITE FIRST WALLS IN JET. The JET Team, *Nuclear Fusion Supplement*, vol. I (IAEA) páginas. 375-384, 1991.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Así se formó la Vía Láctea

De la naturaleza de su halo y disco cabe deducir que algún papel desempeñaron la contracción de una nube de gas, las explosiones de estrellas y la captura de fragmentos galácticos

Sidney Van den Bergh y James E. Hesser

Intentar reconstruir el origen e historia de la Vía Láctea no es empeño que carezca de semejanzas con el de investigar una antigua civilización enterrada bajo el bullicioso y siempre cambiante centro de una ciudad moderna. De las excavaciones del subsuelo, de fragmentos de cerámica y de unos pocos huesos, tenemos que deducir cómo vivieron nuestros antepasados y contribuyeron a crear la cultura viva de las calles bajo las que hoy yacen sus restos. Arqueólogos a su manera, los astrónomos, a partir de pequeñas y dispares pistas, intentan determinar de qué modo nació, unos mil millones de años después de la gran explosión, la Vía Láctea, y qué procesos le dieron su configuración actual. Les sirven de indicios la edad de las estrellas y de los cúmulos estelares, su distribución espacial y su composición química, todo lo cual han de deducir de colores y luminosidades; cuentan, además, con las formas y propiedades físicas de otras galaxias, que les ayudan a entender por qué la nuestra es como es.

En principio, de esos indicios parece desprenderse que la Vía Láctea se formó gracias a la contracción (o colapso) de una ingente nube de gas.

SIDNEY VAN DEN BERGH y JAMES E. HESSER trabajan en el Observatorio Astrofísico del Dominio en Victoria, perteneciente al canadiense Consejo Nacional de Investigación. Desde hace mucho está Van den Bergh interesado en la clasificación y evolución de las galaxias, así como en problemas relacionados con la edad y tamaño del universo. Se licenció en la Universidad de Princeton y doctoró en la de Gotinga. Hesser se siente atraído por la edad y composición de los cúmulos globulares, que se numeran entre los constituyentes más antiguos de la galaxia. Cursó la carrera de física en la Universidad de Kansas, recibiendo el doctorado por Princeton.

Observaciones recientes, sin embargo, han obligado a quienes apoyaban la hipótesis de que no hubo más que una sola y rápida contracción a modificar sus ideas sustancialmente. Otros han creído ver en los nuevos datos la prueba de que nuestra galaxia procede de la contracción de una protogalaxia que a su vez se originó por la fusión de varias nubes de gas. Unos y otros, sin embargo, convergen en reconocer que el nacimiento de estrellas y supernovas ha configurado la Vía Láctea. Ahora mismo estamos asistiendo a la formación y explosión de estrellas que modifican la estructura galáctica y condicionan su destino último.

Buena parte de la información estelar útil tocante a la evolución de la Vía Láctea se encuentra en dos de sus regiones: el halo y el disco galácticos. El halo es una región esférica de rotación lenta que rodea toda la galaxia. Las estrellas y cúmulos estelares que hay en él son viejos. El disco, la región ecuatorial de alta velocidad de rotación, aloja estrellas jóvenes y de mediana edad, gas y polvo. Inmersos en el disco están los amplios brazos curvos típicos de una galaxia espiral como la Vía Láctea. Entre las estrellas de mediana edad está, a unos veinticinco mil años luz del centro galáctico, el Sol. (Cuando miramos el cielo nocturno, el centro galáctico yace en la dirección de Sagitario.) El Sol tarda unos 200 millones de años en dar una vuelta en torno al centro.

No hace siquiera setenta años desde que se descubrió que el astro



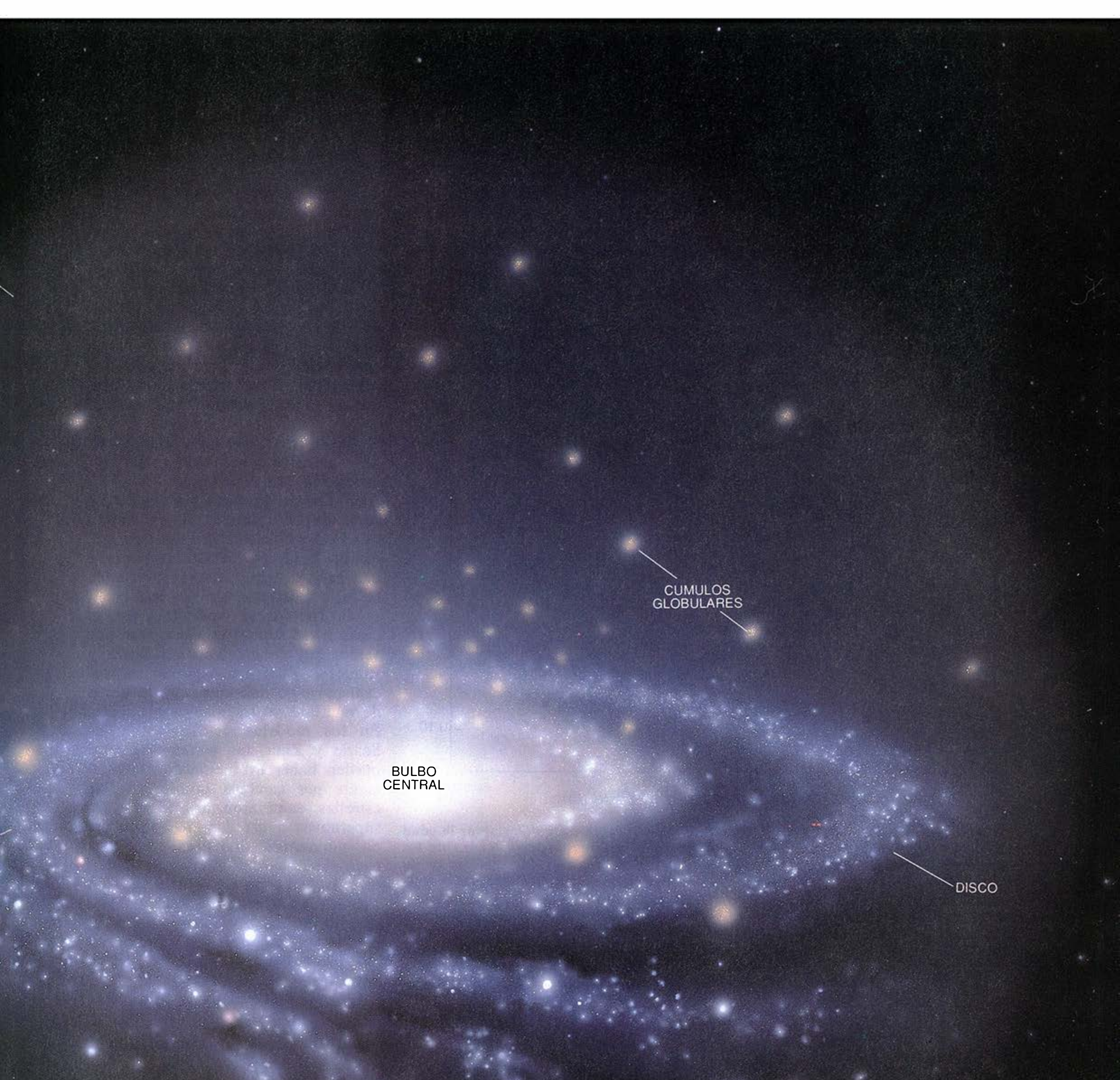
1. COMPONENTES DE LA VIA LACTEA. Son un halo débil, el bulbo central y un disco muy aplanado que contiene los brazos espirales. Las estrellas y nubes de gas del bulbo central oscurecen el núcleo. Las estrellas del bulbo y del halo tienden a ser viejas; las del disco, como el Sol, son jóvenes o de mediana edad.

formaba parte de la Vía Láctea. Bertil Lindblad y Jan H. Oort llegaron por entonces a la conclusión según la cual el sistema de la Vía Láctea era una galaxia aplanada con rotación diferencial. Pocos años después, John S. Plaskett y Joseph A. Pearce confirmaron la hipótesis de Lindblad y Oort a partir de los datos sobre los movimientos estelares que habían ido acumulando a lo largo de treinta años.

Además del disco y del halo, la Vía Láctea contiene dos subsistemas más: el bulbo central, constituido principalmente por estrellas viejas, y el núcleo, en el interior del bulbo. Del segundo sabemos muy poco, porque lo oscurecen densas nubes de gas de la zona central. Los núcleos de algunas galaxias espirales, incluida la Vía Láctea, podrían albergar un gran agujero negro, objeto éste que, en el núcleo de nuestra galaxia, no alcanzaría el tamaño de los agujeros negros que parecen operar en los núcleos de los cuásares.

Estos cuatro componentes de la Vía Láctea están, al parecer, inmersos en una corona extensa de materia invisible. En la mayoría de las galaxias espirales la masa de esta corona invisible es mayor en un orden de magnitud que la de todas las estrellas y el gas visible de la galaxia.

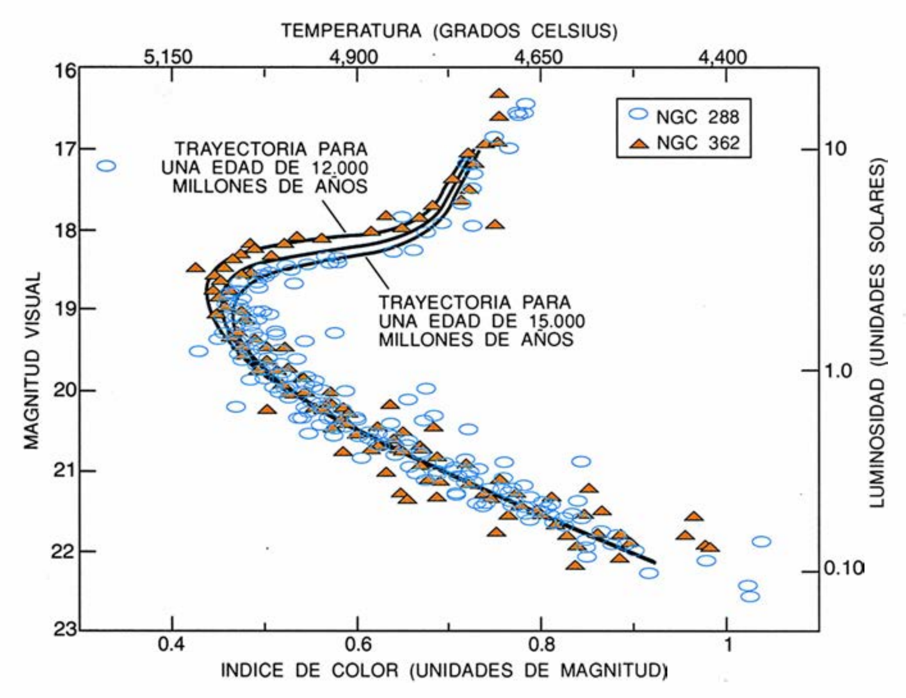
Las claves del desarrollo de nuestra galaxia se encierran en sus componentes. Que el bulbo central fue el primer componente de la galaxia en formarse a resultas de la contracción de una nube de gas es una de las pocas cosas que casi todos aceptan. Al fin y al cabo, el bulbo central contiene sobre todo estrellas viejas y de mucha masa. Más espinoso es determinar cuándo y cómo se generaron el disco y el halo. En 1958, Oort propuso que la población de estrellas en formación en el halo se aplanó hasta



constituir un disco grueso, que éste luego se hizo más estrecho, y que, mientras esto ocurría, nuevas condesaciones de estrellas a partir del hidrógeno allí remanente fueron llenando esa estructura. Otros astrónomos piensan que ambas poblaciones son independientes. V. G. Berman y A. A. Suchkov, en concreto, han señalado que el disco y el halo pudieran haberse desarrollado por separado.

Hubo, sostienen, un lapso de tiempo entre la formación de estrellas en el halo y su aparición en el disco. Según su modelo, un fuerte viento producido por explosiones de supernovas interrumpió la creación de estrellas en el disco durante varios miles de millones de años, arrojando una parte considerable de la masa de la protogalaxia al espacio intergaláctico. Este proceso parece haber predominado en la Gran Nube de Magallanes, una de las pequeñas galaxias satélites de la Vía Láctea. Allí debieron de pasar unos diez mil millones de años entre el brote inicial de creación de conglomerados de estrellas viejas (los cúmulos globulares) y la formación reciente de estrellas en el disco. Otros descubrimientos corroboran la idea de la independencia de los componentes galácticos. La cercana galaxia M33 posee halo y carece de bulbo nuclear, fenómeno que indica que el halo no es, frente a lo que se afirmaba, mera extensión del interior.

En 1962 apareció un modelo que seguirían numerosos investigadores. Olin J. Eggen, Donald Lynden-Bell y Allan R. Sandage propusieron que la Vía Láctea se formó al contraerse rápidamente, en sólo unos cientos de millones de años, una enorme nube rotante de gas. A medida que la nube caía en su propio interior, la protogalaxia giraba más rapidamente, y la rotación fue creando los brazos espirales que hoy vemos. Al principio, la nube estaría formada totalmente por átomos de hidrógeno y helio sintetizados durante las primeras etapas, densas y calientes, de la gran explosión. Con el tiempo, la protogalaxia empezó a crear estrellas de masa enorme y corta vida. Estas estrellas modificaron la composición de la materia galáctica de tal manera que las siguientes generaciones de estrellas, a las que pertenece el Sol, contienen cantidades considerables de elementos más pesados que el helio.



2. LOS DIAGRAMAS DE COLOR-LUMINOSIDAD sirven para determinar la edad de las estrellas. Este compara las posiciones en el gráfico de las estrellas de los cúmulos globulares NGC 288 y NGC 362 con las trayectorias de vida (*las líneas negras*) establecidas por los modelos de evolución estelar. El índice de color, expresado en unidades de magnitud, es una medida de la intensidad de las longitudes de onda azules menos la de las longitudes visibles. En general, cuanto más brillante es una estrella, menor índice de color tiene; esta tendencia se invierte en las estrellas cuyo brillo es superior a la magnitud diecinueve, más o menos. La gráfica sugiere que la edad de los cúmulos difiere en unos tres mil millones de años. La temperatura (inversamente relacionada con el índice de color) y la luminosidad han sido calibradas con los valores de NGC 288.

Aunque este modelo se ganó la aceptación de muchos, las observaciones realizadas durante los últimos treinta años han sacado a luz una serie de problemas. En primer lugar, se ha encontrado que muchas de las estrellas y cúmulos estelares más viejos del halo galáctico se mueven en órbitas retrógradas, es decir, que giran alrededor del centro galáctico en sentido opuesto al de la mayoría de las estrellas. De tales órbitas cabe colegir que la protogalaxia era informe y turbulenta, o que capturó grandes fragmentos gaseosos cuya materia se movía en diferentes direcciones. En segundo lugar, los modelos dinámicos muestran que la protogalaxia no pudo contraerse, como predicen los modelos simples, uniformemente; antes bien, las partes más densas habrían caído hacia el interior a mayor velocidad que las más enrarecidas (o tenues).

En tercer lugar, la escala del tiempo de formación de la galaxia quizás haya sido mayor que la deducida por Eggen y sus colegas. Explosiones de supernovas, vientos de plasma procedentes de estrellas de gran masa y corta vida, y la energía que emana de la actividad del núcleo son factores a tener en cuenta. La galaxia podría, además, haberse rejuvenecido a sí misma gracias a la absorción de enormes flujos de gas intergaláctico primigenio o por la captura de pequeñas galaxias satélites ricas en gas.

Varios investigadores elaboraron modelos que casaran mejor con los nuevos conocimientos. En 1977, Alar Toomre propuso que la mayor parte de las galaxias se originaron por la fusión de varios grandes pedazos, y no por la contracción de una nube de gas. Una vez producida la fusión, la nube de gas resultante, según Toomre, se contrajo, y evolucionó hasta formar la Vía Láctea que vemos hoy en día. Leonard Searle y Robert J. Zinn han sugerido un mecanismo algo diferente, con la unión de multitud de fragmentos pequeños. En los modelos de Toomre y de Searle y Zinn, las partes originales pueden haber evolucionado químicamente por caminos propios. Si las estrellas empezaron a brillar y las supernovas a estallar en fragmentos en momentos distintos, entonces cada porción debería haber dejado en el todo la huella de su composición química característica. Recientemente, uno de nosotros (Van den Bergh) ha hallado las diferencias que en tal caso cabría esperar que se diesen entre las poblaciones del halo.

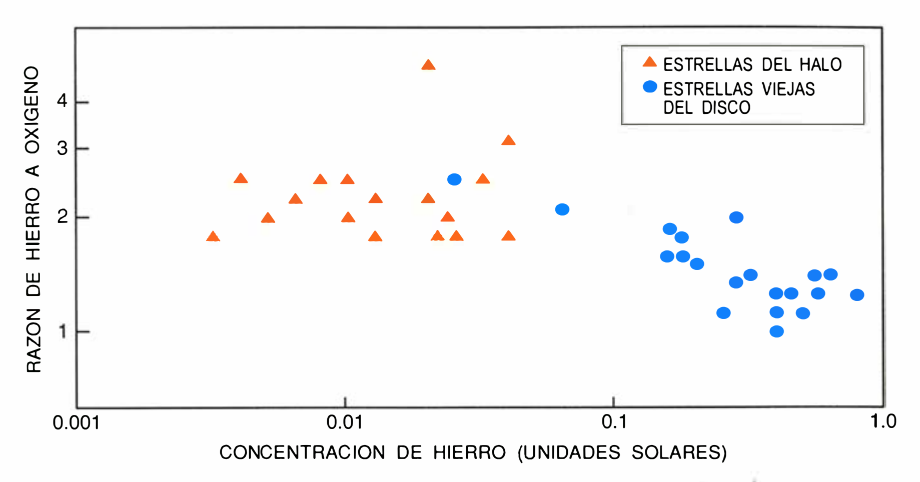
El debate acerca de la historia de

la galaxia no avanzó más allá de este punto hasta los años ochenta. Por entonces pudieron tomarse con precisión jamás antes alcanzada imágenes de objetos muy tenues. Ello fue de la mayor importancia, ya que las teorías físicas de producción de energía estelar —y por tanto de la vida media y edad de las estrellas— son más seguras cuando se las aplica a las estrellas de la secuencia principal. Estas estrellas queman hidrógeno en sus núcleos; en general, cuanto mayor es su masa, antes completan su vida en la secuencia principal. Por desgracia, esto quiere decir que las estrellas de secuencia principal que quedan en el halo son debilísimas. Las mayores, y en consecuencia más luminosas, se volvieron invisibles tiempo ha y dejaron atrás su etapa en la secuencia principal. Los cúmulos suelen emplearse para determinar la edad. Su interés obedece a que podemos calcular mucho mejor su distancia de la Tierra que en el caso de las estrellas.

El hallazgo técnico al que le debemos la posibilidad de estudiar las estrellas debilísimas del halo es el dispositivo de carga acoplada (DCA). Este detector, muy sensible, produce imágenes electrónicamente mediante la conversión de intensidad luminosa en corriente eléctrica. El DCA es muy superior en casi todo a una emulsión fotográfica, si bien se requiere un soporte lógico muy refinado, como el realizado por Peter B. Stetson, para sacarle todo el partido posible. Empleado de esta manera, el DCA ha multiplicado por diez la precisión de las mediciones de colores y luminosidades de las estrellas débiles de los cúmulos globulares.

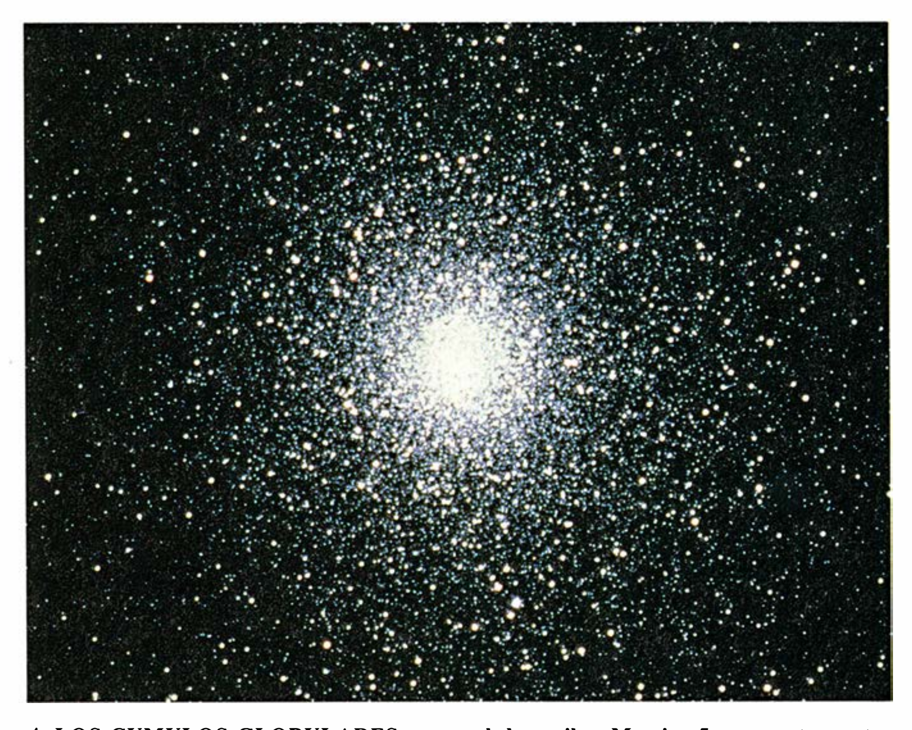
Uno de los resultados destacables obtenidos con dicha técnica ha sido una estimación más precisa de la edad de estrellas. Según los datos de edades relativas en ella basados, las edades de los cúmulos cuya composición química indica que fueron los primeros en crearse tras la gran explosión no difieren en más de quinientos millones de años. Sin embargo, las edades de otros cúmulos presentan una mayor dispersión.

Las edades medidas de esta forma han servido para determinar cuánto tiempo tardó en constituirse el halo galáctico. Michael J. Bolte midió detenidamente colores y luminosidades de distintas estrellas de los cúmulos globulares NGC 288 y NGC 362. Una comparación de estos datos con los cálculos de la evolución estelar muestra que NGC 288 tiene, aproximadamente, quince mil millones de años, y NGC 362 sólo doce mil millones. Esta diferencia es mayor que la incertidumbre en las medidas. El margen de edades observado indica que la contracción del halo externo tuvo lugar en un período de tiempo probablemente mayor en un orden de magnitud al predicho por el modelo de contracción simple y rápida de Eggen, Lynden-Bell y Sandage.



3. LOS COCIENTES ENTRE HIERRO Y OXIGENO, en cuanto funciones de la metalicidad (concentración de hierro) de las estrellas del halo y de las estrellas viejas del disco, indican procesos de formación diferentes. (Los cocientes se dan en unidades solares.) Las elevadas razones en las estrellas pobres en metales del halo sugieren que contienen oxígeno sintetizado en supernovas de los tipos Ib, Ic y II. Las supernovas del tipo Ia parece que han suministrado material sólo a las estrellas del disco. Las mediciones fueron realizadas por Beatriz Barbuy y Marcia Erdelyi-Mendes, de la Universidad de São Paulo.

Cabe, desde luego, que la formación de la galaxia respondiese a más de un modelo de los propuestos. El de Eggen-Lynden-Bell-Sandage quizá sea válido para el bulbo y el halo interno. Es posible que las partes externas de la galaxia, menos densas, se hayan desarrollado a partir de la fusión de fragmentos siguiendo las pautas propuestas por Toomre o por Searle y Zinn. De haber sido así, los

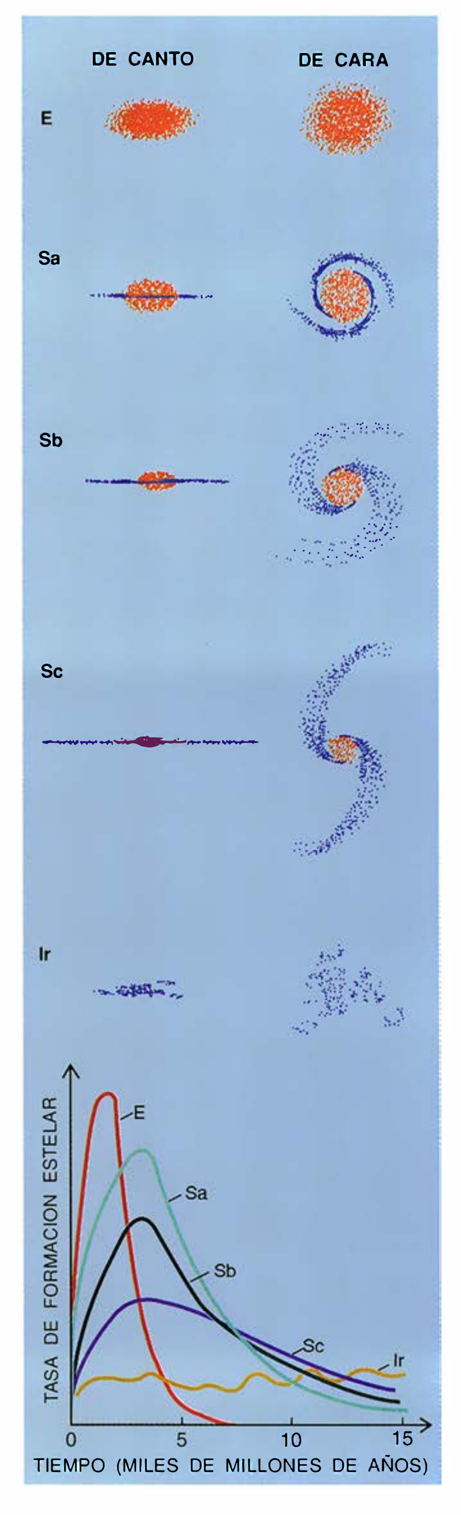


4. LOS CUMULOS GLOBULARES, como el de arriba, Messier 5, se cuentan entre los objetos más viejos del universo; constituyen una inapreciable fuente de datos sobre la formación, hace unos quince mil millones de años, del halo. Las concentraciones de elementos pesados de sus cien mil estrellas son parecidas, de donde se deduce que la nube de gas progenitora era químicamente homogénea.

cúmulos del halo interno deberían haberse formado antes que los cúmulos de las débiles regiones externas. Este proceso daría cuenta, pues, de las diferencias de edad detectadas en los cúmulos globulares. Para obtener modelos más precisos habrá quizá que esperar a que se modifiquen las cámaras del telescopio espacial Hubble y se mejore con ello la calidad de las imágenes que proporcionan.

No basta conocer la edad del halo para contar con un modelo detallado de la formación galáctica. Hemos de saber también la edad del disco, y compararla con la del halo. Al igual que los cúmulos globulares sirven para determinar la edad de éste, otro tipo de cuerpo celeste —las muy débiles enanas blancas— puede utilizarse para determinar la edad del disco. La ausencia de enanas blancas en el disco galáctico, cerca del Sol, fija un límite inferior para la edad del disco. Las enanas blancas, que ya no producen energía radiante, necesitan un tiempo muy largo para enfriarse, y su ausencia denuncia que la juventud de la población del disco es bastante joven: no pasa de unos diez mil millones de años. Esta cifra, muy por debajo de la edad de los cúmulos del halo, se muestra coherente con la idea de que la mayor parte del disco se desarrolló después que el halo.

No está todavía claro, sin embargo, si hubo verdaderamente un lapso de tiempo entre el fin de la formación del halo galáctico y el principio de la creación del viejo y grueso disco. Para estimar la duración de este período de transición, los investigadores han comparado las edades de las estrellas más viejas del disco con las más jóvenes del halo. Los dos cúmulos estelares más viejos que se sepa del disco galáctico, NGC 188 y NGC 6791, rondan, según Pierre Demarque, David B. Guenther y Elisabeth M. Green, los ocho mil millones de años. Stetson y su equipo, y Roberto Buonanno y el suyo, han establecido que los cúmulos globulares más jóvenes del halo —Palomar 12 y Ruprecht 106— tienen unos once mil millones de años de antigüedad. Si esa diferencia de unos miles de millones de años entre los objetos del disco y los cúmulos globulares del halo es auténtica, entonces los cúmulos globulares jóvenes quizá sean el nexo de unión entre las poblaciones del disco y las del halo galáctico.



5. CLASIFICACION MORFOLOGICA de las galaxias (*arriba*), que va de las elípticas (E) a las espirales (subdivididas en las categorías Sa, Sb, Sc) e irregulares (Irr). El proceso de formación estelar varía con la morfología (*abajo*). En las galaxias elípticas, las estrellas se desarrollaron a partir de una explosión inicial. No fue tan violenta en las galaxias espirales la creación de estrellas, si bien continúa aún hoy. En la mayoría de las galaxias irregulares la tasa de nacimiento de estrellas ha permanecido, seguramente, constante.

Por desgracia, hasta el momento sólo se han estimado con precisión las edades relativas de unos pocos cúmulos globulares. Mientras siga siendo así, no podrá descartarse que la Vía Láctea arrancó Palomar 12 y Ruprecht 106 de las Nubes de Magallanes mediante fuerzas de marea. Esta idea, propuesta por Douglas N. C. Lin y Harvey B. Richer, hace que sea innecesario suponer un largo tiempo de contracción. Es más, el aparente lapso entre las edades del disco y del halo podría ser engañoso. Quizás el proceso de datación de los cúmulos adolezca de errores sistemáticos que no han sido detectados. Por otra parte, interacciones de tipo gravitacional con nubes interestelares de gran masa podrían haber destruido los cúmulos viejos del disco, dejando tras de sí sólo los más jóvenes.

La determinación de la edad relativa del halo y del disco aporta no poco sobre la secuencia de formación de la galaxia, pero deja abierta la cuestión de su edad absoluta. La respuesta nos daría un marco de referencia gracias al cual podríamos esclarecer la sucesión de hechos que condujeron a su configuración actual. Casi todos los astrónomos que estudian cúmulos estelares creen que la edad de los cúmulos más viejos está entre los quince y los diecisiete millones de años y, por tanto, también la de la galaxia.

La confianza en la veracidad de esta edad absoluta procede de las medidas de concentración de isótopos radiactivos en los meteoritos. Las razones entre las abundancias de torio 232 y uranio 235, de uranio 235 y uranio 238, o de uranio 238 y plutonio 244 sirven como cronómetros. Acotan la edad de la galaxia entre diez y veinte mil millones de años de antigüedad. Al parecer, la determinación de la edad mediante razones isotópicas es menos precisa que la establecida por la comparación de observaciones y modelos estelares; no obstante, que ambas cifras estén de acuerdo es alentador.

Hay galaxias de muchas formas. Edwin P. Hubble descubrió en 1925 que las galaxias podían ordenarse en una secuencia lineal según fueran elípticas, espirales e irregulares. Las galaxias elípticas son las más evolucionadas. Han consumido todo (o casi todo) su gas en crear estrellas cuyas edades están seguramente entre los diez y los quince mil millones de años. Al contrario que las galaxias espirales, las elípticas carecen de estructuras de disco. La prin-

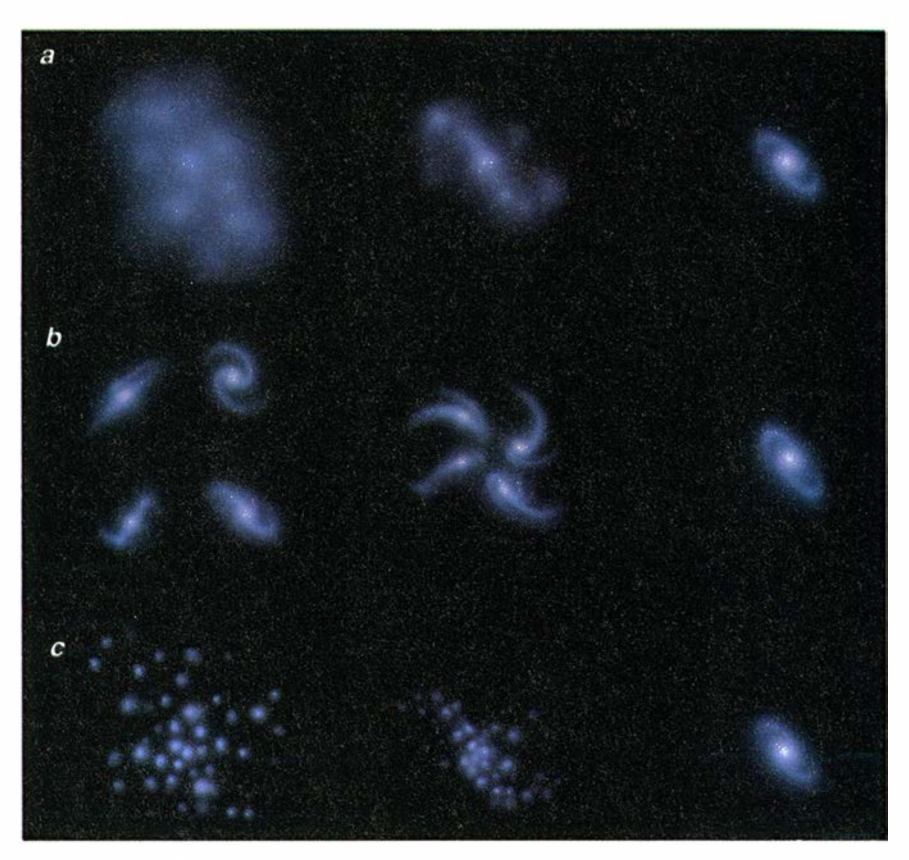
cipal diferencia entre las galaxias espirales y las irregulares estriba en que las segundas no tienen ni brazos espirales ni núcleo compacto.

La morfología de las galaxias está en correlación con la velocidad con la que han ido gastando su gas para crear estrellas. La determinación de la tasa del consumo de gas debería corroborar las estimaciones de la edad e historia de la Vía Láctea. La producción de estrellas empezó rápida y vigorosamente en las galaxias espirales hace unos quince mil millones de años, para caer luego de forma drástica. En la mayoría de las galaxias irregulares, el nacimiento de estrellas ha tenido lugar de manera más lenta y constante. Esa es la razón de que todavía les quede una fracción importante de su gas primordial.

El coeficiente de formación de estrellas en galaxias espirales parece estar a mitad de camino entre el de las elípticas y el de las irregulares. La creación de estrellas en las espirales comenzó más lentamente que en las elípticas, pero continúa hasta el presente.

Las espirales pueden subdividirse a su vez en tres tipos, Sa, Sb y Sc. La subdivisión se basa en el tamaño relativo de los bulbos nucleares y en el grado de abertura de los brazos. Las primeras tienen mayores bulbos nucleares y sus brazos están enrollados más apretadamente; contienen algo de hidrógeno neutro en forma gaseosa y unas pocas estrellas azules jóvenes dispersas. Las del tipo Sb constan de poblaciones bastante nutridas de estrellas azules jóvenes en sus brazos. Su bulbo central, menos prominente que en las del tipo Sa, aloja estrellas rojas viejas. Por último, en las galaxias espirales de tipo Sc la luz proviene principalmente de las estrellas azules jóvenes de sus brazos espirales. La población del bulbo es poco visible, o inexistente. La Vía Láctea podría situarse entre los tipos Sb y Sc.

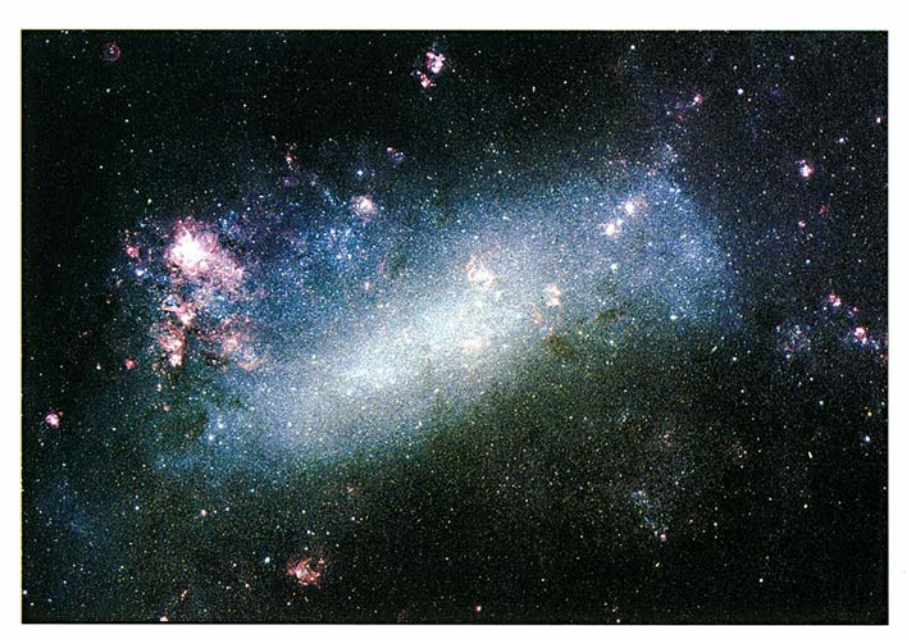
La información obtenida a partir de otras galaxias espirales parece concordar con los datos obtenidos de la Vía Láctea. Como ocurre en ésta, en otras galaxias espirales las estrellas de los bulbos centrales se crearon en una fase temprana. Las regiones densas de gas en el interior debieron contraerse en primer lugar. Por mor de ello, una parte sustantiva del gas primordial inicialmente presente cerca del centro se ha transformado en estrellas o ha sido expulsado por los vientos que las supernovas producen.



6. LOS MODELOS DE FORMACION DE LA GALAXIA se agrupan en tres categorías. Según el modelo de Eggen-Lynden-Bell-Sandage, la Vía Láctea se originó gracias a la contracción rápida de una sola protogalaxia gaseosa (*a*). Según el de Toomre, se fundieron varias agregaciones de gas de gran tamaño (*b*). El modelo de Searle-Zinn, similar al de Toomre, admite que los fragmentos originales son mucho más pequeños y más numerosos (*c*).



7. MESSIER 83 es una típica galaxia espiral del tipo Sc. La Vía Láctea tiene, probablemente, un aspecto similar, salvo que sus brazos deben de estar algo más cerrados.



8. LA GRAN NUBE DE MAGALLANES es una de las dos galaxias satélites mayores que posee la Vía Láctea. La nube cae lentamente hacia la Vía Láctea, y cuando, en un futuro lejano, se suma en ella, la rejuvenecerá de manera transitoria.

Otra fuente que nos da información acerca de cómo se originó la Vía Láctea es la composición química de las estrellas. Sabiéndola, podemos precisar las edades relativas de las poblaciones estelares. Según los modelos estelares, la composición química de las estrellas depende del momento en que nacieron. Esto se debe a que la primera generación de estrellas empezó a "contaminar" el medio interestelar con elementos más pesados que el helio. Estos elementos, a los que los astrónomos llaman "metales", se crearon en el interior estelar o durante las explosiones de las supernovas. El análisis de la composición estelar proporciona historias evolutivas que corroboran o ponen en entredicho las estimaciones de edades.

Distintos tipos de estrellas y supernovas producen distinta concentración relativa de los elementos pesados. Se cree que la mayoría de los elementos del "pico del hierro" (los más cercanos al hierro en la tabla periódica) de la galaxia se generaron en explosiones de supernova del tipo Ia. Las progenitoras de las supernovas Ia son, así se afirma, estrellas binarias cuyas masas son unas pocas veces la solar. Otros elementos pesados —el grueso del oxígeno, neón, magnesio, silicio, calcio y de algunos más— surgieron en supernovas que procedían de estrellas simples o binarias de corta vida y gran masa. Las estrellas de este tipo tienen al principio entre diez y cien veces la masa solar, y terminan sus vidas violentamente convertidas en supernovas de los tipos Ib, Ic o II.

Las estrellas que se formaron en adelante incorporaron algunos de estos elementos pesados. Por ejemplo, el uno o dos por ciento de la masa del Sol se debe a elementos distintos del hidrógeno y el helio. Las estrellas de los bulbos nucleares tienen proporcionalmente, por lo general, más elementos pesados que las estrellas del disco y del halo. La abundancia de elementos pesados decrece gradualmente en un factor de 0,8 por cada kiloparsec (3300 años luz) desde el centro hacia los bordes del disco de la Vía Láctea. Alrededor del setenta por ciento del centenar y medio de cúmulos globulares que conocemos tiene una metalicidad media que ronda la vigésima parte de la solar; el resto, aproximadamente un tercio de ésta.

Estudios detallados de las concentraciones estelares revelan que la proporción de oxígeno respecto a los elementos del pico del hierro es mayor en las estrellas del halo que en las estrellas ricas en metales del disco. Esta diferencia sugiere que las supernovas de los tipos Ib, Ic y II dominaron la producción de metales pesados durante la fase del halo de la evolución galáctica. Es desconcertante que las supernovas de tipo Ia, productoras de hierro, alguna de las cuales provienen, al parecer, de estrellas de corta vida (del orden de unos pocos cientos de millones de años), no contribuyesen más a la mezcla química de la que nacieron las estrellas del halo y algunos cúmulos globulares del mismo. Que no fuese así parece indicar que el halo se contrajo muy rápidamente, antes de que las supernovas de tipo Ia pudiesen suministrar su hierro al gas del halo.

Sin embargo, esta idea no concuerda con el intervalo de cuatro mil millones de años observado en las edades de los cúmulos galácticos, del que se deduce que el halo se contrajo poco a poco. Quizá los vientos producidos por las supernovas esparcieron al espacio intergaláctico el hierro que expelieron las del tipo Ia, lo que pudo ocurrir si las de los otros tipos estallaron, sobre todo, en densas nubes de gas. Las explosiones de las supernovas del tipo Ia deberían haber ocurrido, pues, en regiones menos densas, que los vientos galácticos barren más fácilmente.

A pesar de la cantidad de datos que proporciona, está claro que el estudio del contenido metálico no ha zanjado la controversia sobre la escala temporal de la formación del disco y del halo. Sandage y Gary A. Fouts hallan pruebas de que la contracción tuvo lugar de una vez. Por otra parte, el grupo de John E. Norris, entre otros, defiende que el halo y el disco se constituyeron en buena medida por separado. Mantienen también que la creación de la galaxia pudo ser bastante caótica, de manera parecida a la concebida por Searle y Zinn.

Que haya tal disparidad de hipótesis suele explicarse por el sesgo que produce, casi sin remedio, el modo en que se seleccionen las estrellas a estudiar. Las hay, por ejemplo, que tienen una composición química similar a la de las estrellas "genuinamente" de halo, pero su cinemática las asocia a subcomponentes del disco. Aun siendo vital, la información química, por sí sola, no resuelve los puntos ambiguos tocantes al origen del disco y del halo. Como dice Bernard Pagel, "aunque perros y gatos tengan la misma edad y la misma metalicidad, no por ello dejan de ser perros y gatos".

Además de su utilidad en el conocimiento de la historia ya transcurrida de nuestra galaxia, el disco y el halo también proporcionan información sobre su probable evolución futura. No es difícil calcular que casi todo el gas existente se consumirá en unos pocos miles de millones de años. Esta estimación se basa en la tasa de formación estelar de los discos de otras galaxias espi-

rales y en la suposición de que continuará a su ritmo actual. Una vez se haya agotado el gas, no se formarán más estrellas, y los discos de las galaxias espirales irán desapareciendo. La galaxia, finalmente, no contendrá más que enanas blancas y agujeros negros encerrados en una hipotética corona de materia oscura.

Hay pruebas de distintos tipos que parecen confirmar este esquema evolutivo. En 1978, Harvey R. Butcher y Augustus Oemler Jr. descubrieron que en densos cúmulos de galaxias localizados a unos seis mil millones de años luz se registraban todavía numerosas espirales, escasas o inexistentes, sin embargo, en los cúmulos galácticos cercanos. Esto muestra que, durante los últimos seis mil millones de años, los discos de la mayoría de las espirales de los cúmulos galácticos densos han ido desvaneciéndose hasta hacerse invisibles. Las llamadas galaxias azules, que generan velozmente estrellas de ese color, prueban, por vía más directa, la rápida evolución de las galaxias. Parece que ahora son menos comunes que hace unos pocos miles de millones de años.

Puede, desde luego, que la vida de las galaxias espirales se prolongue más de lo previsto. Una copiosa captación de hidrógeno del espacio integaláctico podría reponer sus reservas de gas; basta con que esté cerca una gran nube, u otra galaxia, que tenga una sustanciosa cantidad del elemento. De hecho, las Nubes de Magallanes se precipitarán un día en la Vía Láctea y la rejuvenecerán pasajeramente. Pero la Vía Láctea no escapará de su destino final. Como las civilizaciones, las estrellas y las galaxias sólo dejan tras de sí restos en un universo siempre cambiante.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GALACTIC ASTRONOMY: STRUCTURE AND KINEMATICS. Dimitri Mihalas y James Binney. W. H. Freeman and Company. 1981.

THE MILKY WAY AS A GALAXY. Gerard Gilmore, Ivan R. King y Pieter C. van der Kruit. University Science Books; Mill Valley, California, 1990.

THE FORMATION AND EVOLUTION OF STAR CLUSTERS. Dirigido por Kenneth Janes. Astronomical Society of the Pacific, 1991.

THE STELLAR POPULATIONS OF GALAXIES. Dirigido por B. Barbury y A. Renzini. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 1992.

Carbohidratos en el reconocimiento celular

Las células colocan en su superficie azúcares que hacen de señales de reconocimiento para otras células. Los medicamentos dirigidos hacia esas moléculas servirán para detener la infección y la inflamación

Nathan Sharon y Halina Lis

En 1952 Aaron Moscona, de la Universidad de Chicago, separó las células de un embrión de pollo al incubarlas en una solución enzimática y agitarlas suavemente. Pero no permanecían aisladas, sino que volvían a reunirse en un nuevo agregado. Moscona observó también que, cuando las células retinianas y las hepáticas convergían así, las retinianas emigraban hacia el interior de la masa celular. Tres años después, Philip L. Townes y Johannes Holtfreter, de la Universidad de Rochester, realizaron un experimento semejante con células de embriones de anfibio, que en este caso se reorganizaban para producir las capas de tejidos de donde procedían.

Estos experimentos, sumados a incontables observaciones, ponen de manifiesto la capacidad de las células para reconocerse entre sí y responder en conjunción. Los espermatozoides, por ejemplo, distinguen los ovocitos de su propia especie de los gametos femeninos de otras, y se unen sólo con los primeros. Algunas bacterias se asientan, de preferencia, en el intestino o en el tracto urinario, mientras que otras lo hacen en órganos diferentes.

Está, pues, justificado, el interés por descifrar el lenguaje de las interacciones celulares. Aunque se desconocen las bases químicas de la mayoría de los fenómenos de reconocimiento celular, han ido surgiendo algunas explicaciones bastante satisfactorias a lo largo del último decenio. Las proteínas, que median en la mayoría de las reacciones químicas en el interior de las células, también aparecen en su superficie, donde, por supuesto, desempeñan su cometido. Abundan, sin embargo, los indicios de que los hidratos de carbono o carbohidratos (también llamados azúcares) son los marcadores principales del reconocimiento celular; de los avances en ese terreno se beneficiarán, sin duda, la prevención y el tratamiento de las enfermedades.

Los biólogos aceptan que las células se reconocen entre sí gracias a la existencia de parejas de estructuras complementarias situadas en su superficie: una estructura acomodada en la superficie de una célula porta información que la estructura de otra puede descifrar, idea que generaliza la hipótesis de la llave y la cerradura, formulada en 1897 por Emil Fischer, para describir la especificidad de las interacciones entre enzimas y sustratos. Paul Ehrlich la amplió en 1900 para explicar la elevada especificidad de las reacciones del sistema inmunitario. Y en 1914 Frank Rattray Lillie, de la Universidad de Chicago, hizo uso de la misma hipótesis para señalar el reconocimiento mutuo de óvulo y espermatozoide.

Hacia los años veinte, la hipótesis de la llave y la cerradura se había convertido en uno de los postulados centrales de la biología celular, lo que impidió que la naturaleza e identidad de las moléculas del reconocimiento celular siguieran envueltas en el misterio. Para la mayoría, la idea de que esas moléculas fueran los carbohidratos parecía descabellada.

La familia de los carbohidratos está integrada por monosacáridos (azúcares simples como la glucosa y la fructosa) y por oligosacáridos y polisacáridos, compuestos por monosacáridos enlazados. Hasta finales de los sesenta creíase que los carbohidratos se limitaban a una función energética (en forma de monosacáridos y de moléculas de reserva como el almidón, un polisacárido) o a una función estructural (los polisacáridos celulosa en las plantas y la quitina en el exoesqueleto de los insectos). Las otras dos familias fundamentales de compuestos biológicos —los ácidos nucleicos, portadores de la información genética, y las proteínas— se erigían, por razones estructurales obvias, en candidatos ideales para desempeñar una gama más amplia de funciones.

Además, poseían una estructura compleja. A diferencia de lo que ocurre con los nucleótidos en los ácidos nucleicos y con los aminoácidos en las proteínas, que sólo se traban de un único modo, los monosacáridos, unidades componentes de oligosacáridos y polisacáridos, presentan distintas posibilidades de unión entre sí. Dos monosacáridos idénticos dan lugar a 11 disacáridos diferentes, mientras que dos aminoácidos idénticos sólo producen un dipéptido. Cuatro nucleótidos diferentes originarán 24 tetranucleótidos

NATHAN SHARON y HALINA LIS se hallan adscritos al departamento de biofísica del Instituto Weizmann en Rehovot. Durante largos años han trabajado juntos en el estudio de carbohidratos complejos y lectinas, proteínas que se unen selectivamente a los carbohidratos.

distintos, mientras que cuatro monosacáridos diferentes podrían configurar hasta 35.560 tetrasacáridos.

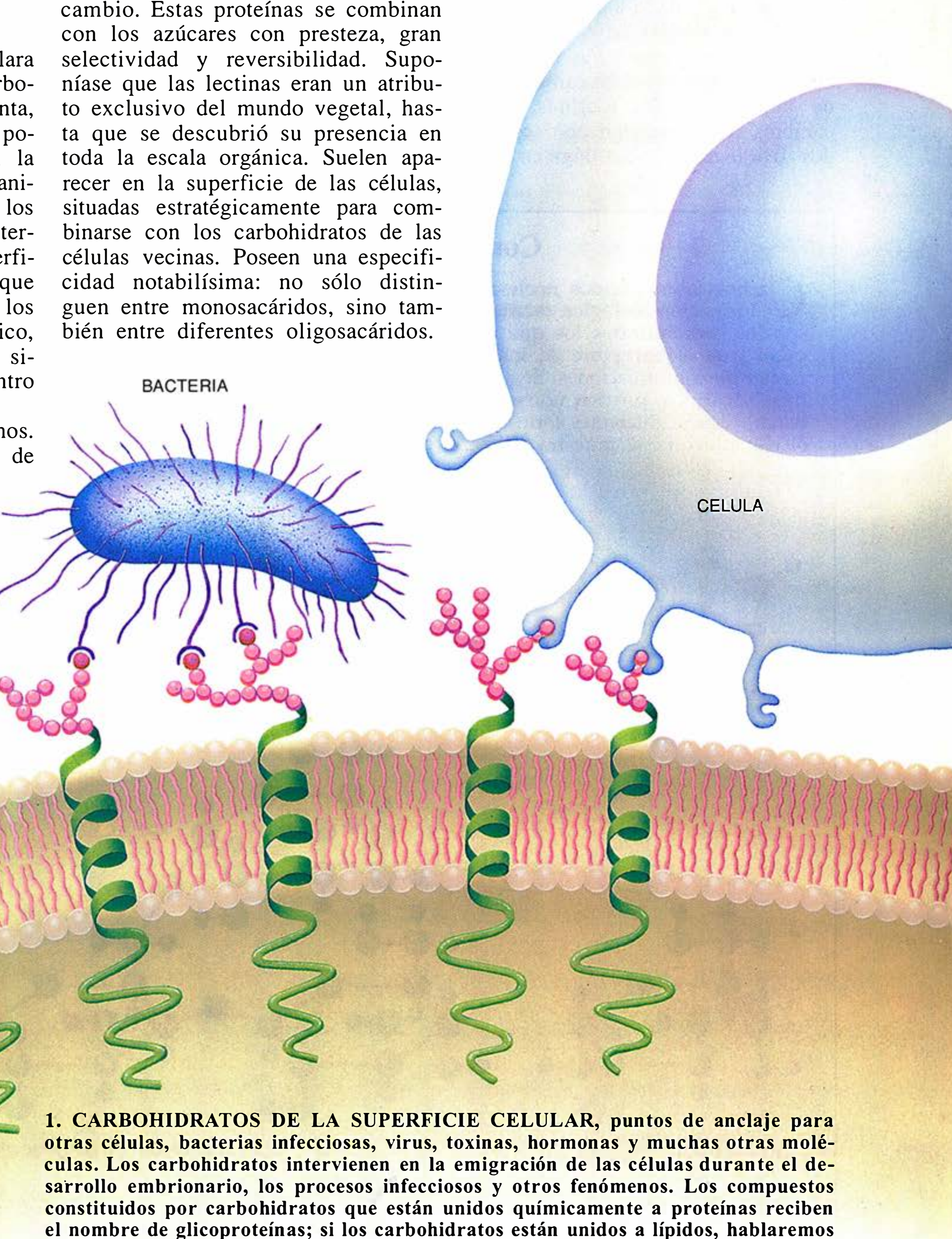
Tamaña diversidad estructural representa una ruina para el químico de azúcares, al mismo tiempo que un enorme beneficio para la célula: hace posible que los polímeros constituidos por monosacáridos sean excelentes portadores de información. Los carbohidratos incorporan mucha más información por unidad de peso que los ácidos nucleicos o las proteínas. En el lenguaje de los azúcares, las palabras se escriben apoyándose no sólo en la variedad de monosacáridos, sino también en los diferentes enlaces que los unen y en la presencia o ausencia de ramificaciones.

Se tardó en tomar conciencia clara de la participación de los carbohidratos. Hacia los años cincuenta, por ejemplo, se sabía ya que los polisacáridos inyectados estimulaban la producción de anticuerpos en los animales. Se conocía también que los grupos sanguíneos AB0 están determinados por azúcares de la superficie de las células de la sangre y que el virus de la gripe se une a los hematíes a través del ácido siálico, un azúcar. Pero hasta la década siguiente no se convirtieron en centro de atención.

Ese cambio se debió a dos hechos. El primero fue el descubrimiento de que todas las células llevan una cubierta de azúcares, constituida en su mayor parte por glicoproteínas y glicolípidos, dos tipos de carbohidratos complejos en los que los azúcares están unidos a proteínas y lípidos respectivamente. Se conocen ya varios millares de glicoproteínas y glicolípidos, número que crece a un ritmo vertiginoso. Tamaña diversidad tiene su sentido: el repertorio de las estructuras ubicadas en la superficie de la célula según ésta se desarrolle, enferme o entre en fase de diferenciación. El conjunto de carbohidratos de una célula cancerosa diverge del que porta una célula normal.

Las lectinas propiciaron también el cambio. Estas proteínas se combinan con los azúcares con presteza, gran selectividad y reversibilidad. Suponíase que las lectinas eran un atributo exclusivo del mundo vegetal, hasta que se descubrió su presencia en toda la escala orgánica. Suelen aparecer en la superficie de las células, situadas estratégicamente para combinarse con los carbohidratos de las células vecinas. Poseen una especificidad notabilísima: no sólo distinguen entre monosacáridos, sino también entre diferentes oligosacáridos.

A propósito de la interacción entre lectinas y carbohidratos en el reconocimiento celular, debemos reseñar el trabajo de G. Gilbert Ashwell y de Anatol Morell, quienes, en 1968, separaron enzimáticamente unas cuantas moléculas de ácido siálico de ciertas glicoproteínas del plasma sanguíneo, y las inyectaron en conejos. Aunque las glicoproteínas persisten durante algún tiempo en la circulación de la sangre, vieron que desa-



1. CARBOHIDRATOS DE LA SUPERFICIE CELULAR, puntos de anclaje para otras células, bacterias infecciosas, virus, toxinas, hormonas y muchas otras moléculas. Los carbohidratos intervienen en la emigración de las células durante el desarrollo embrionario, los procesos infecciosos y otros fenómenos. Los compuestos constituidos por carbohidratos que están unidos químicamente a proteínas reciben el nombre de glicoproteínas; si los carbohidratos están unidos a lípidos, hablaremos de glicolípidos.

parecían en seguida las moléculas deficientes en ácido siálico.

Ashwell y Morell observaron que las glicoproteínas acababan en el hígado. La eliminación de los ácidos siálicos había dejada desnuda la galactosa de las glicoproteínas, y las galactosas expuestas se habían unido a una lectina de las células hepáticas. Se demostró luego que, si eliminaban los ácidos siálicos y las galactosas al descubierto, volvía a su valor normal la velocidad de eliminación, fuera de la sangre, de las moléculas. A partir de estos resultados, llegaron a la conclusión de que las cadenas laterales de carbohidratos de las proteínas servían quizá de marcadores para identificar cuáles han de ser eliminadas de la circulación para su degradación ulterior.

A semejanza de los carbohidratos de superficie, las lectinas sufren cambios que coinciden con los estados fisiológicos y patológicos de la célula. En 1981 Reuben Lotan y Abraham Raz, del Instituto Weizmann, demostraron que las células tumorales procedentes de ratón o de hombre portan una lectina de superficie que no se encuentra en las células normales; más tarde se evidenciaría la implicación de esa lectina en el desarrollo de metástasis.

Trabajando con embriones de ratón, Senitiroh Hakomori y Ten Feizi han demostrado que, cuando un óvulo fecundado se divide, las estructuras de los carbohidratos de las células embrionarias resultantes cambian de acuerdo con patrones característicos. Uno de los carbohidratos es el trisacárido conocido por antígeno 1 embrionario específico del estadio (SSA-1), o también Lewis^x (Le^x). Aparece en el estadio de 8 a 16 células, cuando el embrión, hasta entonces un agrupamiento celular más o menos suelto, adquiere una estructura esférica, lisa y compacta.

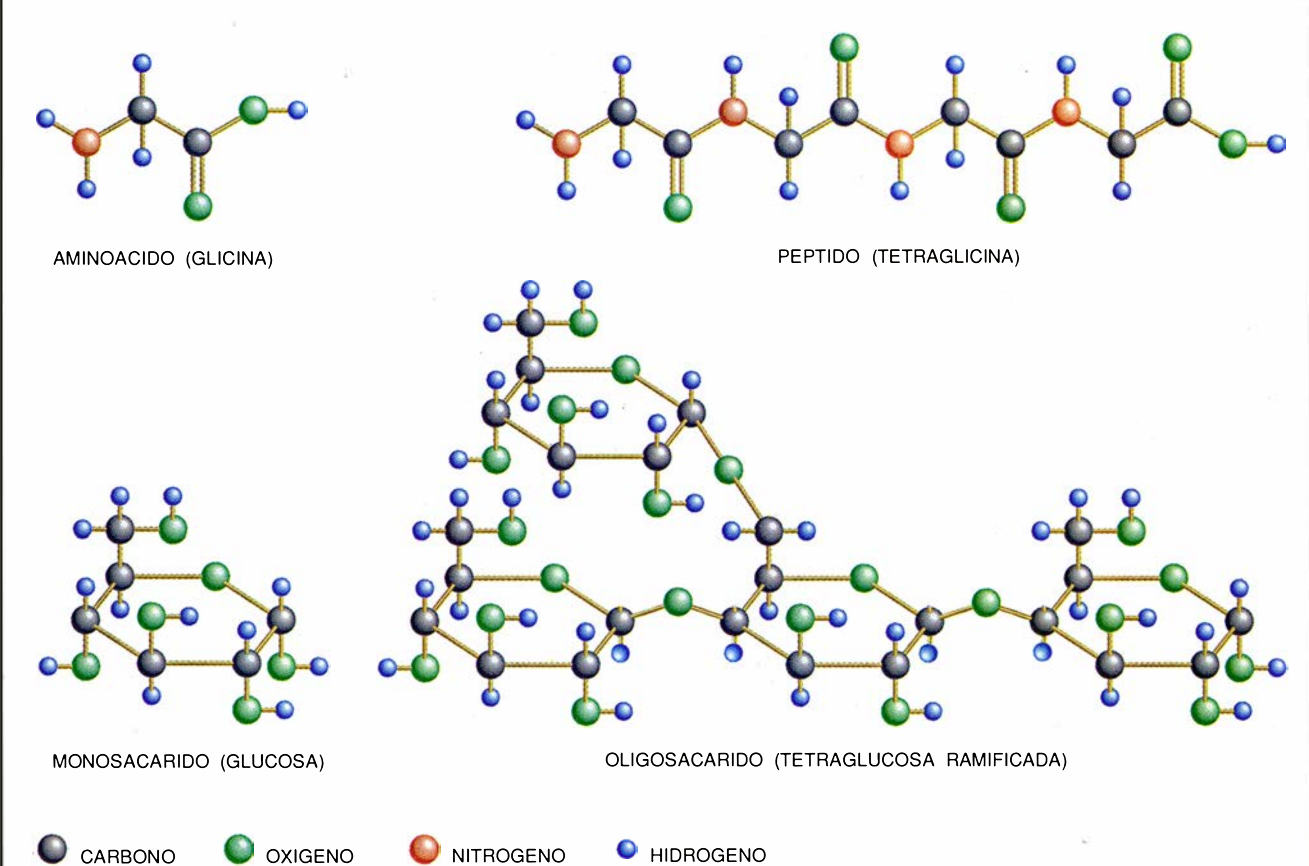
El grupo de Hakomori ha demostrado que un compuesto soluble que lleva unidades múltiples del mismo trisacárido inhibe el proceso de compactación e interrumpe la embriogénesis. Otros carbohidratos, de estructura muy parecida, no intervienen para nada. De lo que se infiere que el trisacárido Le^x desempeña algún papel en el proceso de compactación.

Los carbohidratos adhesivos son, pues, esenciales en el desarrollo embrionario. Con el tiempo iremos dominando los pormenores de dicha participación. Sabemos bastante ya sobre la adhesión bacteriana a las células hospedadoras y la adhesión de los leucocitos a los vasos sanguíneos. Las interacciones mejor entendidas conciernen a la adhesión microbiana, objeto de estudio desde hace una veintena de años y modelo de otras formas de reconocimiento celular mediada por carbohidratos.

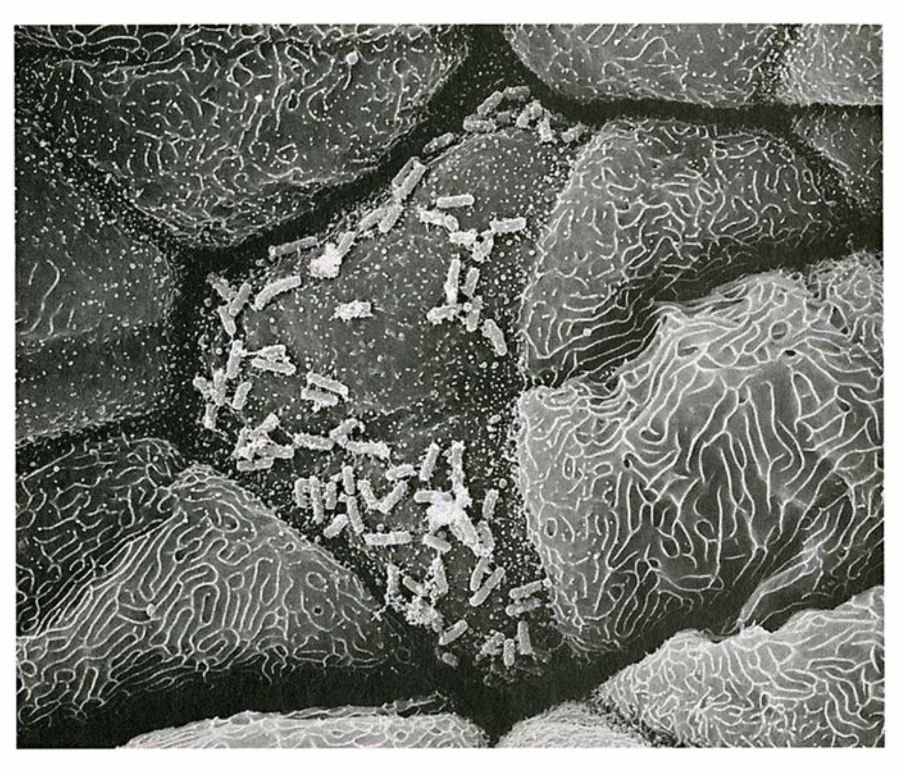
Para ejercer su acción dañina, los

Complejidad estructural de los carbohidratos

Carbohidratos, ácidos nucleicos y proteínas llevan información biológica escrita en sus estructuras. Pero son los carbohidratos los que ofrecen una mayor capacidad para el transporte de información merced a su variedad de conformaciones. Sus unidades estructurales, los monosacáridos, pueden unirse entre sí en varios puntos dando lugar a diferentes formas lineales o ramificadas; en el ejemplo que se muestra abajo, el carbohidrato ramificado es una entre muchas otras estructuras que pueden formarse a partir de cuatro moléculas idénticas de glucosa. Los aminoácidos en las proteínas, así como los nucleótidos en los ácidos nucleicos, generan sólo estructuras lineales, lo que restringe su diversidad. El péptido (un fragmento de proteína) que se muestra abajo es la única estructura posible que se obtiene a partir de cuatro moléculas del aminoácido glicina.



virus, las bacterias y los protozoos deben adherirse a la superficie de un tejido de un organismo sensible. Los agentes infecciosos que carecen de esa capacidad son barridos de esos sitios potenciales de infección por los mecanismos de limpieza del organismo. Los microorganismos que lleguen a las vías respiratorias superiores, por ejemplo, podrán ser tragados y luego destruidos por el ácido del estómago. Los del tracto urinario podrán ser arrastrados por la orina.



2. ADHESION SELECTIVA de las bacterias a los tejidos. A través de las fimbrias, las bacterias se unen a ciertos carbohidratos de la superficie celular. Estas interacciones determinan qué tejidos son susceptibles de la invasión bacteriana. (Las "colillas" son bacterias de *Escherichia coli* instaladas en el tracto urinario.)

Las primeras pistas acerca del mecanismo de la adhesión bacteriana se las debemos a J. P. Duguid. En los años cincuenta, Duguid demostró que muchas cepas de *Escherichia coli* (enterobacteria que puede colonizar otros tejidos) y bacterias emparentadas se adhieren a células del revestimiento epitelial de los tejidos y a los eritrocitos. En presencia de bacterias pegajosas, los hematíes forman acúmulos —un fenómeno al que se da el nombre de hemaglutinación. Para averiguar cómo se unen las bacterias a las células, Duguid las expuso a una gama amplia de compuestos. Vio que sólo el monosacárido manosa y azúcares afines inhibían la hemaglutinación.

Observó, asimismo, que las cepas bacterianas responsables de la hemaglutinación sensible a la manosa tenían apéndices pilosos submicroscópicos en su superficie. Estas estructuras miden de 5 a 10 nanómetros de ancho por varios centenares de largo. Les dio el nombre de fimbrias, palabra latina que significa flecos. Por aquel entonces, Charles C. Brinton, Jr., describió las mismas estructuras y les dio el nombre de *pili*, vocablo latino que significa pelos. Ambos términos se siguen usando.

Llegamos a los años setenta, cuando aparecieron los primeros trabajos del grupo de Ronald J. Gibbons sobre la adhesión selectiva de bacterias a nichos de la cavidad oral. Gibbons observó que el *Actinomyces naeslundii* colonizaba la superficie epitelial de niños (sin dientes o con ellos) y adultos. Por el contrario, la bacteria *A. viscosus*, emparentada con aquélla, no medraba en la boca hasta que los dientes ya habían salido de las encías; prefiere los dientes a las superficies epiteliales de la boca.

La especificidad de la adhesión bacteriana a un tejido determinado, lo sabemos ahora, constituye un fenómeno general: *E. coli*, agente causal común de las infecciones del tracto urinario, abunda en los tejidos que rodean los conductos que unen el riñón a la vejiga, pero no frecuenta el tracto respiratorio superior. Por su lado, los estreptococos del grupo A, que colonizan sólo el tracto respiratorio superior y la piel, raramente producen infecciones del tracto urinario.

La adhesión bacteriana varía no sólo de un tejido a otro, sino también entre especies y, en ocasiones, entre individuos de la misma especie a tenor de la edad, constitución genética y estado de salud. A principios de los setenta, los equipos de R. Sellwood y Richard A. Gibbons estudiaron la infectividad de la cepa K88 de *E. coli*. Estas bacterias, pesadilla de granjeros, producen diarrea en el cochinillo. El grupo de Gibbons vio que las bacterias K88 se adherían a las células abdominales de los cochinillos expuestos, pero no a la de los cerdos adultos o del hombre, que son resistentes a la infección de tales microorganismos. Los mutantes de bacterias que habían perdido la capacidad de unirse a las células intestinales se mostraron también incapaces de infectar a los animales.

Además, algunos cochinillos presentaban una resistencia genética a las K88: ni siquiera las bacterias potencialmente virulentas podían unirse a las células de su intestino. Con la selección genética de cerdos inmunes se logró una progenie resistente a las K88.

El organismo causante de la gonorrea, *Neisseria gonorrhoeae*, es otro ejemplo de especificidad de especie y tejido. Se adhiere a las células humanas de los epitelios genital y oral, pero no a las células de otros órganos o de otras especies animales. Ahí reside el motivo de que el hombre sea hospedador exclusivo de la *N. gonorrhoeae* y de que otros animales no contraigan la gonorrea.

La propuesta avanzada en 1977 por Itzhak Ofek, David Mirelman y uno de nosotros (Sharon) dio un gran impulso al estudio de la adhesión bacteriana. Afirmábamos que la adhesión bacteriana estaba mediada por las lectinas bacterianas de superficie que se unían a los azúcares complementarios de la célula hospedadora. La idea se ha asentado. Se ha comprobado que las bacterias producen lectinas específicas de ciertos carbohidratos y dependen de esas proteínas para adherirse a un tejido del hospedador, primer paso del proceso infectivo.

Las lectinas mejor caracterizadas son las que corresponden a las fimbrias del tipo 1 de *E. coli*, que se unen, de preferencia, a las glicoproteínas de superficie que contienen manosa. Por los estudios de Catharina Svanborg-Edén conocemos el funcionamiento de las fimbrias P, que interaccionan específicamente con la substancia P de los grupos sanguí-

neos, un glicolípido muy común en cuya composición entra el disacárido galabiosa. Los equipos de Karl-Anders Karlsson y Victor Ginsburg han cartografiado las especificidades de lectinas de una amplia gama de cepas bacterianas.

De esas investigaciones se deduce que las bacterias no se unen sólo a los extremos de los carbohidratos de superficie; se traban también con azúcares del interior de la estructura. Además, diferentes bacterias pueden engarzarse en zonas diversas del mismo carbohidrato. Y si en una célula queda expuesta una sola cara de oligosacárido, aquélla se unirá a bacterias de una clase y no a otras. La capacidad de los azúcares de superficie para servir de puntos de unión depende de la presencia de los glúcidos, así como de su accesibilidad y modo de presentación.

Se está consolidando la idea según la cual la unión de las bacterias a los azúcares de superficie de la célula hospedadora marca el comienzo de la infección. Se aduce, por ejemplo, que las células epiteliales del tracto urinario de los individuos que carecen de la substancia P de los grupos sanguíneos no se unen a las bacterias *E. coli* portadoras de fimbrias P; estos individuos son mucho menos sensibles a la infección bacteriana que el resto de la población. Pero las bacterias se unirán a las células epiteliales si éstas se recubren antes con un glicolípido sintético que contenga galabiosa.

Las células intestinales de cochinillos resistentes a *E. coli* K88, el agente causal de la diarrea, carecen del macrocarbohidrato al que se engancha la bacteria. Aunque se desconoce la estructura exacta del carbohidrato, se sabe que está presente en los cochinillos sensibles y ausente en el cerdo adulto, por cuya razón las bacterias no logran instalarse en el intestino del cerdo adulto y colonizarlo, en tanto que infectan al lechal.

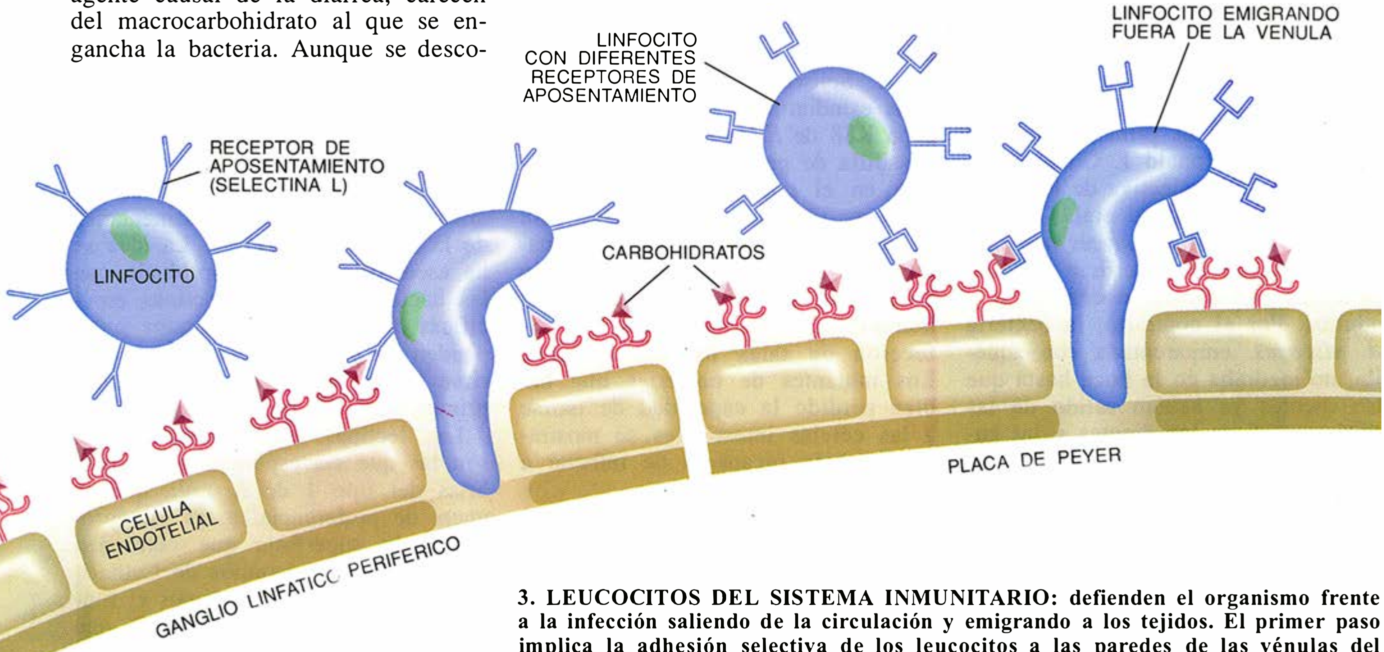
Otro caso interesante es el de la cepa K99 de *E. coli.* Al igual que la K88, la cepa K99 produce diarrea en animales estabulados pero no en el hombre. Menos específica que la K88, infecta terneras, corderos y lechones. Las bacterias K99 se unen a un glicolípido que contiene ácido *N*-glicocolilneuramínico (un tipo de ácido siálico) ligado al lactosilcerámido. Este glicolípido, presente en cochinillos, terneras y corderos, está ausente en las células del cerdo adulto y del hombre, que a su vez contienen ácido *N*-acetilneuramínico, un análogo del ácido siálico no enlazante. En este caso, una pequeña diferencia entre dos azúcares similares —la sustitución de un grupo acetilo por otro glicolilo— se detecta rápidamente por las bacterias, lo que explica la gama de hospedadores de la infección.

Las ideas que se acaban de exponer han recibido un nuevo respaldo de los experimentos con dos lectinas de las fimbrias de *E. coli* que infectan el tracto urinario del hombre y del perro. Ambas lectinas reconocen la galabiosa, si bien una se une sólo a las células del epitelio humano y la otra sólo a las células del perro. Los glicolípidos de la superficie de las células que llevan galabiosa varían de forma sutil; las pautas de unión de las lectinas se ajustan a la vinculación de la cepa de *E. coli* con el hospedador.

Al ser la adhesión bacteriana un hecho clave en el proceso de la infección, la investigación médica está considerando seriamente el uso de azúcares para su prevención y tratamiento. Los azúcares que selectivamente inhiben la adhesión podrían actuar como distractores moleculares, interceptando los patógenos antes de que alcanzaran su correspondiente tejido.

En colaboración con Ofek, Moshe Aronson y Mirelman, iniciamos esa línea en 1979. Inyectamos una cepa de *E. coli* específica de manosa en la vejiga urinaria de ratones. En algunos animales, inyectamos también alfa-metilmanósido, un azúcar que en el tubo de ensayo inhibía la adhesión bacteriana a las células epiteliales. La presencia del azúcar redujo la colonización bacteriana del tracto urinario.

Svanborg-Edén ha realizado experimentos análogos con *E. coli* portadora de fimbrias P que infecta el riñón del ratón. Incubó las bacterias en soluciones de globotetraosa, un azúcar que se encuentra en el glicolípido de las células renales. Inyectó luego esas bacterias en los ratones y persistieron en el riñón durante menos tiempo que las bacterias sin tratar. James A. Roberts obtuvo resultados semejantes en experimentos con monos: la incubación de *E. coli* de fimbrias P con un azúcar semejante a la galabiosa retrasó el desarrollo de las infecciones del tracto urinario.



3. LEUCOCITOS DEL SISTEMA INMUNITARIO: defienden el organismo frente a la infección saliendo de la circulación y emigrando a los tejidos. El primer paso implica la adhesión selectiva de los leucocitos a las paredes de las vénulas del endotelio alto (*fotografía*). La adhesión depende de las selectinas, que se unen a los

Los glicopéptidos pueden oponerse también a la unión de las bacterias a los tejidos del hospedador. En 1990, el grupo de Michelle Mouricout demostró que las inyecciones de glicopéptidos obtenidos del plasma sanguíneo de vacas protegían a las terneras recién nacidas frente a dosis letales de *E. coli*. Los glicopéptidos con azúcares para los que la bacteria tienen afinidad desanima la adhesión de las bacterias al intestino de los animales tratados.

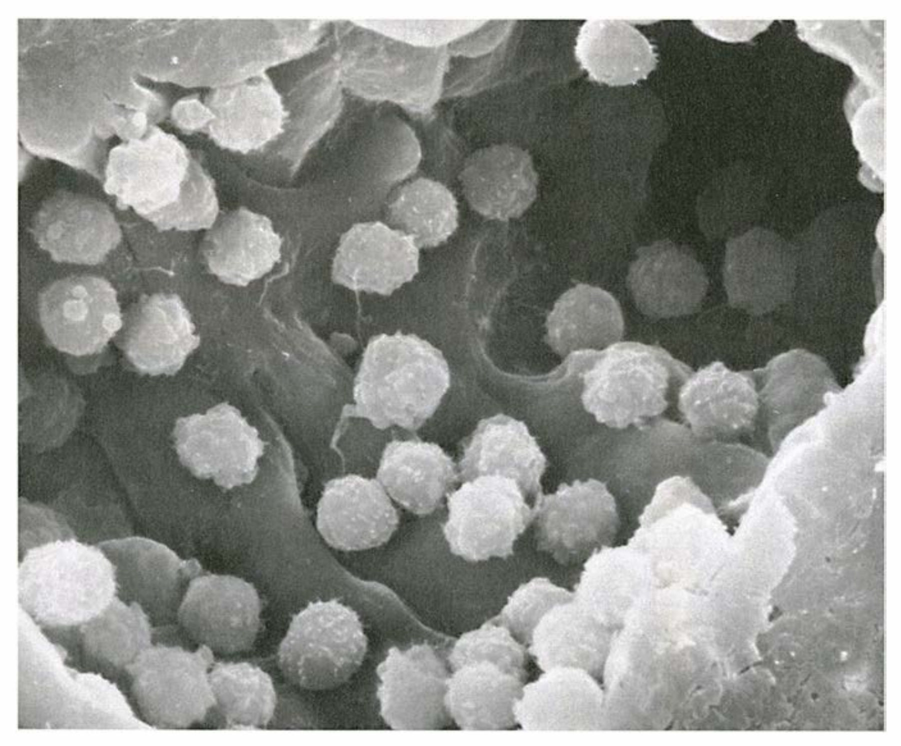
La verdad es que, para bloquear la adhesión bacteriana, no se necesitaría ni siquiera un carbohidrato —valdría cualquier agente que pugnara por enlazarse con la lectina bacteriana o el carbohidrato de la superficie de la célula hospedadora. En ese contexto, Edwin H. Beachey y sus colaboradores han utilizado anticuerpos frente a la manosa para evitar la infección de ratones con determinados *E. coli* específicos de manosa. Los anticuerpos se unen a la manosa de las células, bloqueando los sitios de unión de la bacteria.

Los resultados experimentales avalan la posibilidad de terapias antiadhesivas en las enfermedades bacterianas. Nuevos estudios en torno a la acción de los azúcares sobre la célula hospedadora y las lectinas bacterianas habrán de conducir al diseño de mejores inhibidores bacterianos. Un punto relacionado con este enfoque se considera ya como algo seguro: puesto que los agentes infecciosos —incluidas bacterias diferentes dentro de la misma cepa— pueden tener una amplia gama de especificidades de carbohidratos, parece imprescindible conjugar diversos inhibidores para prevenir o tratar estas enfermedades.

Las interacciones intercelulares dirigidas por carbohidratos no se limitan a los fenómenos patológicos; intervienen en el funcionamiento normal del sistema inmunitario, cuyos componentes principales son los leucocitos. Este grupo lo integran diversas células —linfocitos, monocitos y neutrófilos— que actúan de forma conjunta para eliminar bacterias y otros intrusos, y para mediar en la respuesta inflamatoria de los tejidos afectados. Aunque los leucocitos circulan por la sangre, es en los espacios extravasculares donde llevan a cabo sus funciones principales.

El endotelio, recubrimiento interno de los vasos sanguíneos, atrae a los leucocitos y los dirige al lugar donde se requiere su presencia. El proceso exige un reconocimiento entre leucocitos circulantes y células endoteliales exquisitamente regulado y mediado, quizá, por una familia de lectinas estructuralmente emparentadas. Se las suele llamar selectinas porque son moléculas mediadoras del contacto selectivo entre las células; también se las denomina moléculas LEC-CAM (acrónimo de la expresión inglesa "leucocyte-cell, or lectin, adhesion molecules").

Las selectinas, proteínas complejas muy asimétricas, presentan una configuración en mosaico poco habitual. Constan de tres tipos de dominios funcionales: uno que sirve de ancla para fijar la selectina a la membrana celular; otro dominio que forma la mayor parte de la molécula, y un tercero, localizado en el extremo extracelular de la molécula y cuya estructura semeja la de las lectinas animales que actúan sólo en presencia de iones calcio. La unión de las moléculas de carbohidrato a ese dominio es fundamental para el funcionamiento de las selectinas en las interacciones entre las células.

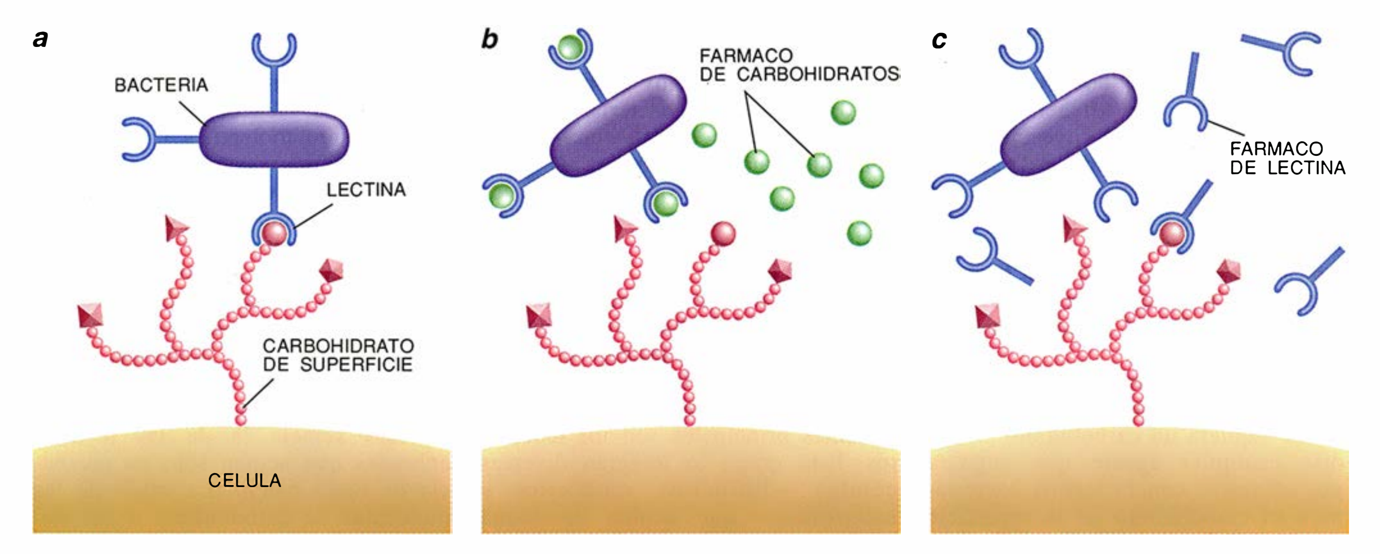


carbohidratos de otras células. Las selectinas L, o receptores de aposentamiento, situadas en la superficie de los linfocitos, determinan sobre qué células endoteliales se fijarán. Una vez que el linfocito se ha unido al endotelio, tiene ya el camino preparado para salir de la circulación sanguínea.

Hace unos 10 años, Eugene C. Butcher e Irving L. Weissman establecieron los criterios para entender de qué modo las selectinas (cuya existencia se desconocía) dirigen el tráfico de los linfocitos. Los linfocitos se caracterizan por un rasgo muy peculiar: patrullan por el organismo en busca de antígenos bacterianos o víricos. Con ese propósito, los linfocitos salen del torrente circulatorio y recorren los ganglios linfáticos, las amígdalas, las adenoides, las placas de Peyer y otros órganos linfoides secundarios; la emigración de los linfocitos es selectiva y cada uno busca el órgano correspondiente. Para abandonar la circulación, se unen a las vénulas del endotelio alto, unos vasos sanguíneos de menos de 30 micras de luz.

Con una técnica especial que Hugh B. Stamper, Jr., y Judith J. Woodruff desarrollaron, Butcher y Weissman observaron que la especificidad del aposentamiento está dictada por la interacción selectiva de los linfocitos con las vénulas de endotelio alto en los órganos diana. Butcher y Weissman consiguieron un anticuerpo monoclonal, el MEL-14, que se une a los linfocitos que emigraron a los ganglios linfáticos periféricos. En los cortes de tejido, los anticuerpos bloquearon la adhesión de los linfocitos a las vénulas de endotelio alto de dichos tejidos, pero no de otros órganos linfáticos. Cuando se inyecta en el ratón, el MEL-14 inhibe la emigración de los linfocitos a los ganglios linfáticos periféricos.

Butcher y Weissman demostraron también que su anticuerpo se une a la membrana del linfocito a través de la selectina L, glicoproteína responsable de la unión específica de los linfocitos a las vénulas de endo-



4. BLOQUEO DE LA ADHESION BACTERIANA para combatir la infección. Como preludio de la infección, las lectinas de la superficie bacteriana se unen a la superficie de los carbohidratos de la célula hospedadora susceptible. (*a*). Los fármacos que porten carbohidratos parecidos podrán evitar la adhesión al unirse a las lectinas (*b*); o también, los fármacos que se parezcan a las moléculas de lectina podrían tener el mismo efecto al ocupar los sitios de enlace de los carbohidratos (*c*).

telio alto y conocida también por receptor de aposentamiento.

Si las vénulas de endotelio alto pertenecientes a ganglios linfáticos se exponen a soluciones de selectina L, los linfocitos pierden su adhesividad: las moléculas de selectina L ocupan todos los sitios potenciales de unión a las células endoteliales. Y, a la inversa, como Steven D. Rosen ha demostrado, ciertos azúcares pequeños y polisacáridos de mayor tamaño pueden bloquear también las interacciones entre lifocitos y vénulas endoteliales. En esos casos, los azúcares se han unido a la selectina. L. Weissman, por un lado, y Laurence A. Lasky y Rosen, por otro, demostraron en 1989 que el receptor de aposentamiento es el mediador de la adhesión de los linfocitos a las células endoteliales.

A diferencia de lo que ocurre con el receptor de aposentamiento, las otras dos selectinas suelen recalar en las células endoteliales, y aun entonces sólo cuando atraen a los leucocitos. Michael P. Bevilacqua descubrió en 1987 una de éstas, la selectina E (ELAM-1). Dos años después, era descubierto el tercer miembro, la selectina P (antes GMP-140 y PADGEM) por Rodger P. McEver y Bruce y Barbara Furie, en trabajos independientes.

Cuando un tejido se infecta, segrega en reacción defensiva citocinas, grupo al que pertenecen la interleucina-1 y el factor de necrosis tumoral. Las citocinas estimulan las células endoteliales de las vénulas y provocan en ellas la expresión de las selectinas E y P que se ubican en su superficie. Las leucocitos se adhieren a las moléculas que sobresalen de su superficie porque su cubierta de carbohidratos contiene estructuras complementarias. Una vez que se ha unido a la pared de una vénula, el leucocito abandona la sangre escurriéndose entre dos células endoteliales adyacentes.

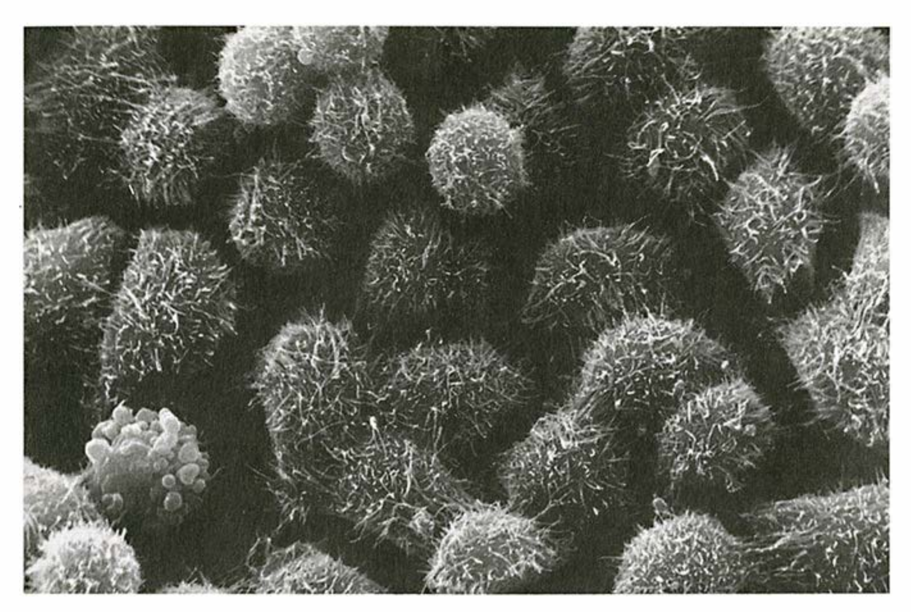
Estas dos selectinas aparecen en las células endoteliales en momentos diferentes y reclutan tipos distintos de leucocitos de la sangre. Las células endoteliales tienen una reserva interna de selectina P que pueden colocar en su superfice en cuestión de minutos después del comienzo de una infección. La selectina P puede, por tanto, atraer leucocitos que actúan en las primeras fases de la defensa inmunitaria. La selectina E, en cambio, sólo se sintetiza en las células endoteliales cuando se requiere, por lo que tarda más en aparecer.

El mecanismo que ayuda a los leucocitos a abrirse paso a través de la barrera endotelial, indispensable para que puedan cumplir sus funciones y





5. EFECTOS SELECTIVOS de los carbohidratos sobre las bacterias. Las bacterias de *E. coli* poseen una lectina para el glicolípido P. Las bacterias incubadas en presencia del azúcar manosa conservan su adhesividad al tejido epitelial (*izquierda*). Un constituyente del glicolípido P se une a la lectina de la bacteria, lo que impide su adhesión (*derecha*).



6. LAS CELULAS CANCEROSAS presentan carbohidratos poco corrientes en su superficie, lo que puede explicar sus propiedades invasivas. La oncoterapia habrá de recurrir a medicamentos que bloqueen la adhesividad de las células anormales.

combatir la infección, tiene su talón de Aquiles: permite la acumulación leucocitaria en puntos inadecuados provocando disfunciones, hinchazón y dolor. La inflamación de la artritis reumatoide, por ejemplo, se produce cuando los leucocitos penetran en las articulaciones y liberan enzimas proteolíticas, radicales libres del oxígeno y otros factores tóxicos. Otro ejemplo es el de las alteraciones hísticas debidas a la interrupción temporal del flujo sanguíneo en el ataque cardíaco. Cuando el flujo sanguíneo se reanuda, los leucocitos de la sangre destruyen los tejidos alterados por la falta de oxígeno.

En teoría, cualquier fármaco que bloquee la adhesión de los leucocitos y su ulterior salida del vaso sanguíneo gozará de propiedades antiinflamatorias. La clave para el desarrollo de tales fármacos está en la estructura de las regiones enlazantes de las moléculas de selectina y en la estructura de los carbohidratos donde se enganchan. Investigación que corre paralela a la de la síntesis de carbohidratos inhibidores de las selectinas E y P. Para que una terapia antiadhesiva sea eficaz, los fármacos deben cumplir un doble objetivo: evitar la salida inoportuna de los leucocitos del torrente y facilitar, por contra, su abandono en el lugar idóneo. No se trata de nada inalcanzable, ya que las especificidades de las moléculas de adhesión varían de un tejido a otro.

Aparte de su implicación en la inflamación, las moléculas de adhesión celular pueden ejercer otros efectos dañinos, verbigracia, la diseminación de las células cancerosas por todo el organismo a partir del tumor principal. El carbohidrato que reconoce la selectina E se expresa en células de diversos tumores, incluidos algunos cánceres. Bevilacqua acaba de exponer que por lo menos un tipo de células cancerosas se une específicamente a la selectina E expresada en el endotelio activado. Quizá para promover sus propias metástasis, algunas células malignas recluten la adhesión de moléculas de las defensas del organismo; en cuyo caso, los medicamentos antiadhesivos podrían tener también propiedades antimetastásicas.

La importancia concedida a los carbohidratos en el reconocimiento celular no ha de hacernos olvidar el interés del lenguaje peptídico. Algunas formas de unión, por ejemplo, implican proteínas de superficie llamadas integrinas y péptidos complementarios. La existencia de más de un sistema de actividades de unión presta una mayor flexibilidad al repertorio de interacciones celulares.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LECTINS AS CELL RECOGNITION MOLECULES. N. Sharon y H. Lis en *Science*, vol. 246, págs 227-234; 1989.

GLYCOBIOLOGY: A GROWING FIELD FOR DRUG DESIGN. Karl-Anders Karlsson en *Trends in Pharmacological Sciences*, vol. 12, n.º 7, págs 265-272; julio de 1991.

CARBOHYDRATES AND GLYCOCONJUGATES: UPWARDLY MOBILE SUGARS GAIN STATUS AS INFORMATION-BEARING MOLECULES. K. Drickamer y J. Carver en *Current Opinion in Structural Biology*, vol. 2, n.º 5, págs 653-654; octubre de 1992.

Marguerite Holloway

RITA LEVI-MONTALCINI: *crecida en la dificultad*

Sus claros ojos azules, hasta su elegante atuendo blanco y negro, manifiestan su resuelta personalidad, de ideas firmes. Feminista perteneciente a una familia de costumbres victorianas, judía y librepensadora en la Italia de Mussolini, Rita Levi-Montalcini ha topado muchas veces en su vida con una u otra forma de opresión. Pero esta neurobióloga acepta las fuerzas que la forjaron. "Si no hubiera sido discriminada, si no me hubiesen perseguido, no habría recibido nunca el premio Nobel", declara.

En el apartamento de Roma que comparte con Paola, su hermana gemela, sentada en el mismo borde del sofá, Levi-Montalcini recuerda la larga y decidida lucha que ha sido su vida, culminada cuando entró, en 1986, en el selecto grupúsculo de mujeres galardonadas con el premio Nobel. Se lo concedieron por su hallazgo de una sustancia esencial para la supervivencia de las células nerviosas. Su descubrimiento del factor de crecimiento nervioso dio un nuevo marco teórico al desarrollo y diferenciación del sistema nervioso. Actualmente, ese y otros factores son objeto de intensa investigación por su poder regenerador de neuronas dañadas, en particular las afectadas en el síndrome de Alzheimer y otras enfermedades degenerativas.

El camino desde Turín, donde nació en 1909, hasta esta serena e impecable sala de estar romana, puso a prueba el valor de Levi-Montalcini desde su más temprana juventud. "Era una sociedad patriarcal, y a mí me sublevaba que las mujeres fuésemos educadas desde la infancia para que todo lo decidiesen los hombres." Al principio quería ser filósofa, pero pronto llegó a la conclusión de que su fuerte no era la lógica. Cuando su institutriz, a quien apreciaba mucho, murió de cáncer, decidió dedicarse a la medicina. Sólo faltaba convencer a su padre, ingeniero, y recuperar el tiempo que había perdido en el instituto femenino, donde el diploma llevaba al matrimonio, no a la universidad. Eso "me irritaba tanto, que decidí no hacer nunca lo que mi madre había hecho. Y fue una buena decisión; en las circunstancias de entonces, si me hubiese casado, nunca habría hecho nada de particular."



Rita Levi-Montalcini, galardonada con el premio Nobel, llevó a cabo investigaciones neurobiológicas mientras las bombas caían en su ciudad durante la Segunda Guerra Mundial.

Tras obtener de su padre el permiso, Levi-Montalcini se preparó para el examen de ingreso, y se matriculó en la Facultad de Medicina de Turín a la edad de 21 años. La atracción que ejercía un famoso y excéntrico profesor, Giuseppe Levi, la decidió a hacerse interna del Instituto de Anatomía. Allí se convirtió en una experta en histología, especialmente en la tinción de las células nerviosas.

Como Levi tenía curiosidad por varios aspectos del sistema nervioso, le asignó una labor hercúlea: descifrar cómo se forman las circunvoluciones cerebrales. Aparte de lo abrumadoramente difícil que era encontrar fetos humanos en un país donde el aborto era ilegal, "el encargo era una tarea imposible, fuera uno estudiante o científico consagrado", explica endureciendo la voz. "Era una cuestión realmente estúpida que yo no podía resolver, que nadie podía resolver."

Abandonó el proyecto —tras una serie de intentos poco gratos en busca de objeto de investigación—, y con permiso de Levi empezó a estudiar el desarrollo del sistema nervioso en embriones de pollo. Algunos años después se vio obligada a interrumpir también este trabajo. Mussolini proclamó la dictadura en 1925, y desde entonces no dejó de crecer en Italia el antisemitismo. En 1939 Levi-Montalcini dejaba la universidad.

Aceptó la invitación que le hizo un instituto neurológico belga, y continuó allí sus investigaciones. Pero, temiendo por su familia, regresó pronto a Turín, justo antes de que Mussolini y Hitler fraguaran su alianza. Imperturbable, Levi-Montalcini no abandonó su trabajo: "No tardé lo más mínimo en organizar un laboratorio en mi dormitorio."

A pesar de su dureza —o quizá, tal como Levi-Montalcini lo ve, a causa de ella—, fue en esa época cuando sentó las bases de las inves-

tigaciones que con el tiempo habría de emprender sobre el factor del crecimiento nervioso. “Nunca se sabe lo que es bueno o malo en la vida. Quiero decir, en mi caso, fue mi buena estrella.” Huyó de Turín con los suyos y se escondieron en los montes cercanos. Allí convencía a los campesinos de que le diesen huevos para sus inexistentes hijos, y de esa forma pudo estudiar cómo se diferencia el tejido nervioso del embrión en tipos especializados. La teoría más aceptada era la del famoso biólogo Viktor Hamburger, de la Universidad de Washington, quien sostenía que la diferenciación, o especialización, de las células nerviosas dependía de su destino final. Hamburger eliminaba miembros en desarrollo de los embriones para comprobar el resultado de dicha amputación en el crecimiento y diferenciación posteriores de las neuronas destinadas a la zona en cuestión.

Hamburger observó que los centros de las células nerviosas del embrión cerca y dentro de la espina dorsal en desarrollo —de donde parten las células hacia el resto de los tejidos— eran mucho menores cuando se eliminaban los botones de las extremidades. Sugirió que algún factor inductor u organizador, alojado probablemente en el miembro, ya no podía actuar sobre las células nerviosas, y por ello, ni se especializaban ni crecían hacia la región del miembro ausente a partir de la médula espinal en formación.

Tras acometer experimentos en esa dirección, Levi-Montalcini llegó a una conclusión diferente. Vio que crecían menos células nerviosas en la zona donde se había eliminado el botón de la extremidad, si bien propuso que faltaba alguna clase de nutriente, importante para la supervivencia de las neuronas y producido normalmente por el miembro. Su teoría se alejaba de Hamburger en que, según ella, sí tenía lugar, a pesar de haberse amputado el miembro, la diferenciación neuronal, pero las células morían en fase precoz porque no recibían cierto factor trófico que necesitaban. El miembro no contribuía a la diferenciación, esto es, no contenía un factor organizativo; más bien producía algo que alimentaba a las células nerviosas ya especializadas.

Hamburger leyó cierto artículo de Levi-Montalcini publicado en una revista belga, y la invitó a St. Louis en 1946. Le ofreció trabajar en el problema de la diferenciación de las neuronas. Con el tiempo reconocería la validez de la interpretación de la italiana. Inicialmente, Levi-Montalcini aceptó un puesto de investigadora en la Universidad de Washington por un semestre, pero permaneció allí hasta 1961.

Recuerda que, cuando llegó a los Estados Unidos, se sentía insegura acerca del futuro de sus investigaciones. Hasta que una serie de observaciones y cierto desafío le devolvieron la sensación de que tenía sentido lo que hacía. Por aquel entonces se creía que las diferencias en el número y función de las distintas células nerviosas eran, en buena medida, resultado de procesos proliferativos.

Pero Levi-Montalcini estaba a punto de descubrir que el desarrollo del sistema nervioso, al menos en parte, sigue una estrategia diferente de la que se venía sosteniendo. Había preparado una serie de cortes con tejidos de médula espinal extraídos de embriones de pollo en diferentes etapas de desarrollo. Observando la sucesión de preparaciones relativas a las fases iniciales del desarrollo, advirtió la migración de las neuronas hasta sus posiciones finales en la médula espinal. Allí vio, por vez primera, la posterior eliminación, o criba, de algunas de ellas. “Puse una cantata de Bach, tan exultante estaba. Me di cuenta de que todavía quedaba mucho por descubrir.”

“A mí me sublevaba que las mujeres fuésemos educadas... para que todo lo decidiesen los hombres”

Se centró en la búsqueda del misterioso factor trófico cuya existencia había intuido durante la guerra. Un antiguo alumno de Hamburger había notado de paso que cierta línea de células tumorales del ratón —el sarcoma 180— promovía el desarrollo de más neuronas. Cuando Levi-Montalcini agregó las células tumorales en embriones de pollo, observó el mismo efecto. Había algo en el tumor que fomentaba la diferenciación neuronal e instaba la creación desmesurada de fibras nerviosas.

Puso su empeño en aislar el factor trófico. Así comenzó su colaboración con el bioquímico Stanley Cohen. Descubrieron que el factor parcialmente purificado contenía ácido nucleico y proteína. Añadiendo enzimas de veneno de serpiente —que rompe los enlaces de esos compuestos— para establecer en dónde se hallaba el componente activo, se encontraron con que el propio veneno contenía el factor.

Este hallazgo (recreado con viveza en su autobiografía, *In Praise of Imperfection*) facilitó otro: la producción de factor de crecimiento nervioso en las glándulas salivales de los ratones. Por medio de un antisuero que ellos mismos prepararon, Levi-Montalcini y Cohen rastrearon qué función desempeñaba el factor, y demostraron que es esencial para la diferenciación y bienestar de las neuronas.

En 1986 Levi-Montalcini y Cohen compartieron el premio Nobel por este logro. Cuando la llamaron por teléfono a Roma para darle la noticia, leía las últimas páginas de una novela de Agatha Christie. “Cuando estaba a punto de averiguar quién era el criminal, me comunicaron que había ganado el Nobel”, comenta divertida. “Me alegró mucho la llamada, pero mi interés estaba absorbido por el final de la historia.”

Sabe sacarle partido a su prestigio. Preside la Asociación Italiana de Esclerosis Múltiple y es miembro de la Academia Pontificia de las Ciencias; fue la primera mujer elegida por ésta. “Puedo hacer cosas muy, muy importantes, que no podría hacer si no hubiera entrado en la Academia”, dice. “Me ha dado la posibilidad de ayudar a mucha gente.” Y ayuda a todos los que puede. El teléfono suena sin cesar en su apartamento. “La gente pide ayuda médica”, explica tras responder cada llamada y hablar cortésmente con los padres o parientes de algún enfermo. “Pero a veces no hay nada que hacer.”

Además, Levi-Montalcini y su hermana empezaron hace poco su propio proyecto: una fundación que proporcionará mentores, consejos y becas a adolescentes que no hayan aún decidido en qué campo de las artes o de las ciencias van a adentrarse. Varias horas por semana recibe a jóvenes estudiantes en su laboratorio del Instituto de Neurobiología del Consejo Nacional de Investigación en Roma. La investigación de Levi-Montalcini en el instituto, que fundó en los años sesenta, ha dado también un nuevo giro. Hoy estudia el papel del factor del crecimiento nervioso en los sistemas inmune y endocrino. “El factor neotrófico es sólo la punta del iceberg”, apunta. “Tanto es así, que, a estas alturas, aún estoy haciendo algo completamente diferente. Con el mismo espíritu que cuando era una persona joven. Y eso me gusta mucho”, dice riéndose. “Quiero decir que, siendo ya vieja, podrían habérseme agotado las fuerzas. Pero creo que todavía tengo para dar y tomar.”

Ciencia y sociedad

Arrecifes coralinos

Blanqueo por estrés

Los arrecifes de coral de todo el mundo están sufriendo un proceso de blanqueo cuyas causas se desconocen: los corales, por naturaleza verdes, dorados, rosados o grises, se tornan de un color blanco puro, en retales o por entero. El proceso, que puede ser letal para las madréporas, se ha asociado a varios factores (enfermedades, exceso de sombra, aumento de la radiación ultravioleta, contaminación y cambios en la salinidad), pero los casos mejor conocidos corresponden a episodios de temperaturas del agua anormalmente altas provocadas por fenómenos de tipo ENSO (El Niño-Oscilación del Sur).

Los arrecifes de coral son formaciones de aguas someras propias de los mares tropicales, en latitudes que van del extremo sur de Florida a la mitad de la costa australiana. Figuran entre los ecosistemas marinos más productivos y diversos, comparables por ello a las pluviselvas tropicales. La diversidad obedece en buena medida a las complejas estructuras que las madréporas construyen, que generan heterogeneidad y multitud de microhábitats adecuados para algas, invertebrados y peces de grupos muy dispares. La exuberante productividad resulta de la relación simbiótica entre los pólipos coralinos y las zooxantelas, algas microscópicas que se encuentran en los tejidos transparentes de los pólipos, a los que confieren su color.

Hay de uno a dos millones de zooxantelas por centímetro cuadrado de tejido madrepórico. A través de la fotosíntesis estas algas producen hasta el 60 por ciento del alimento que precisan los corales, al tiempo que favorecen la deposición del esqueleto de carbonato cálcico. Las algas reciben de los corales nutrientes, escasos en los mares tropicales de aguas azules, y refugio. Cuando los corales se blanquean es porque pierden sus algas simbiontes a una tasa muchísimo mayor que la que corresponde a su renovación normal; los tejidos transparentes de los pólipos dejan ver el esqueleto calcificado.

Ignoramos en qué resida el mecanismo exacto de liberación de las algas simbiontes. En situaciones de bajamar importante, las colonias de corales que quedan al descubierto pueden "decolorarse" porque retiran sus tejidos hasta que vuelve a subir la marea; pero esta forma de evitar la desecación no implica la pérdida de las algas. El verdadero blanqueo fue descrito hace 65 años por Maurice Yonge y A. G. Nicholls, participantes en una expedición a la Gran Barrera de Arrecifes de Australia; sugirieron que, en respuesta al estrés ambiental, las algas migraban desde los tejidos hasta la cavidad digestiva de los pólipos, de donde eran expulsadas al agua. Pero no supieron identificar el disparador preciso del proceso, que sigue sin conocerse.

Leonard Muscatine, de la Universidad de California en Los Angeles, atribuye la causa de la liberación de las algas a la caída de nutrientes que éstas reciben de los corales, tras reducir esos invertebrados la producción de dióxido de carbono, nitrógeno y fósforo debido a una disminución de su metabolismo como respuesta al aumento de la temperatura. En el laboratorio, Muscatine y otros investigadores han demostrado que en anémonas y corales la pérdida no afecta sólo a las algas, sino también a tejido del animal. Pero no está claro que en el mar las algas abandonen los corales como lo hacen en el laboratorio, donde el ambiente artificial puede someterlas a un estrés adicional.

Otras hipótesis sugieren que las algas emiten sustancias tóxicas cuando se ven sometidas a condiciones adversas, sustancias que pueden afectar negativamente al patrón. Así se producen unos compuestos de oxígeno, los radicales superóxidos, detoxificados por una enzima de los corales, la superóxido dismutasa. En situaciones de temperaturas elevadas aumenta la síntesis enzimática. David Miller, de la Universidad de Leeds, sugiere que los cambios ambientales pueden alterar la expresión génica, y con ello la producción de proteínas que ayudan a resistir el choque térmico.

Distintos estudios han demostrado que tanto las algas simbiontes (pertenecientes a una sola especie) como las diferentes especies de corales presentan variabilidad genética, y sus distintos morfos podrían tener distintas tolerancias ambientales, lo que explicaría el blanqueo "a retazos" de algunos arrecifes.

Algunos de los casos de blanqueo en masa de arrecifes en el Caribe y en otras regiones han coincidido con episodios ENSO de notable intensidad; en 1982-83, más del 95 por



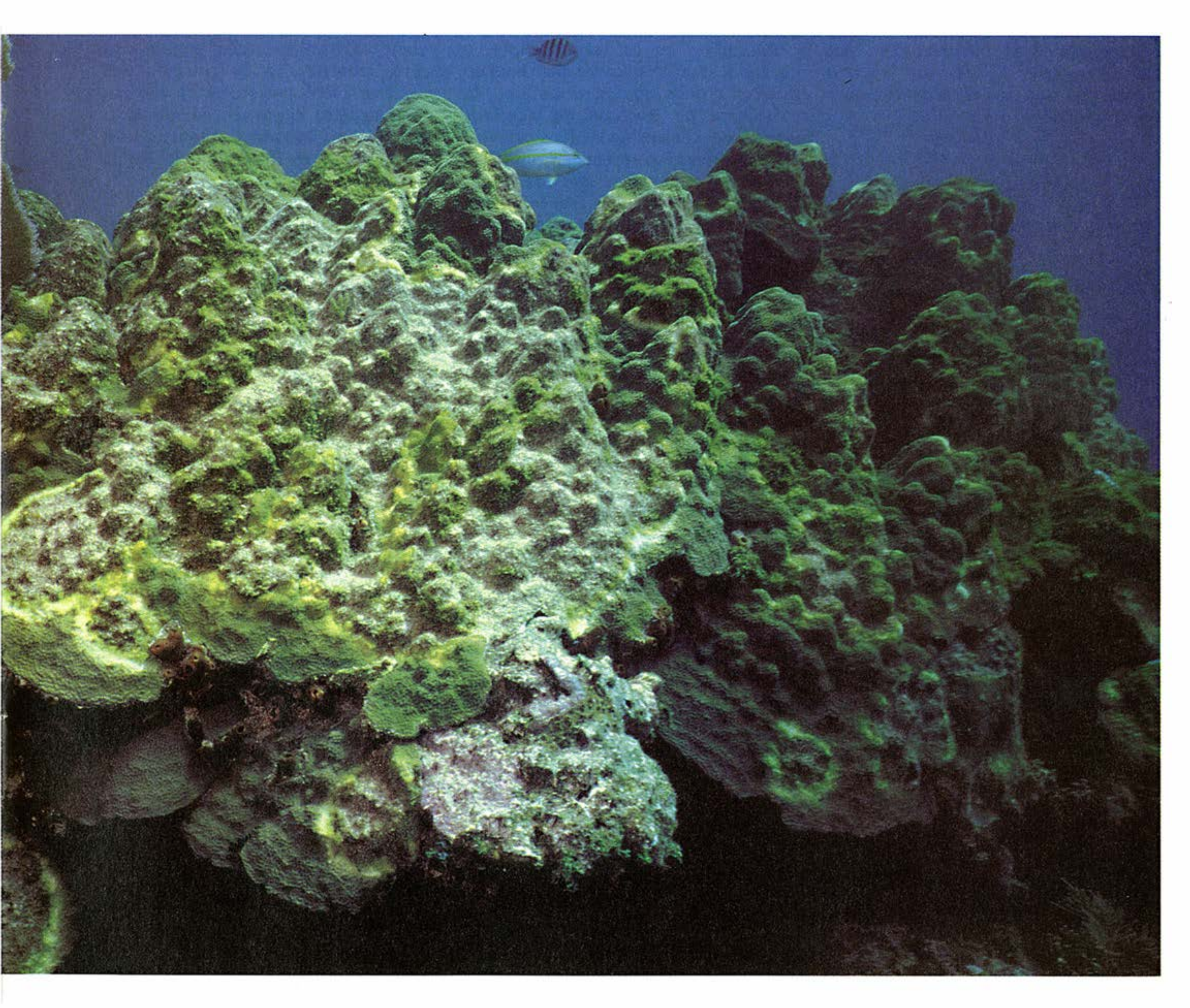
Esta madrépora se ha blanqueado sólo a retazos. Aunque varios factores pueden causar un blanqueo potencialmente letal, los episodios recientes se han correlacionado siempre con temperaturas del agua superiores a las normales.

ciento de los corales de las islas Galápagos y entre el 70 y el 90 por ciento de los de Panamá y Costa Rica murieron algunas semanas después del blanqueo. Experiencias de laboratorio demostraron que *Pocillopora damicornis*, el principal coral arrecifal en el Pacífico oriental, era sensible a temperaturas del orden de 32 grados C. Temperaturas similares se alcanzaron aquel año en el mar, pero no está claro que ocurriera lo mismo en 1987, otro año de ENSO con blanqueo de corales.

Sea cual fuere la causa del blanqueo, sus consecuencias para la estructura del ecosistema son enormes. Los fondos de *Pocillopora*, muy densos, constituyen una barrera natural para un depredador voraz de los corales, la estrella de mar de corona de espinas *(Acanthaster planci)*, que no se aventura a su través porque es sensible a las células urticantes de sus tentáculos. Varias especies de crustáceos asociadas a *Pocillopora,* de cuyo mucus se alimentan, atacan también a las estrellas de mar. Al faltar este coral ramificado, las estrellas de corona de espinas tienen el camino abierto hacia los corales de mayor porte; decaen también las poblaciones de crustáceos y cesa su efecto disuasor sobre las estrellas depredadoras. Los efectos de la depredación, añadidos a los del blanqueo, son catastróficos. Algas oportunistas colonizan los esqueletos de los corales muertos, que son comidas por herbívoros, algunos de los cuales raspan la superficie de los corales muertos, con lo que impiden la instalación de nuevos corales y coadyuvan a la erosión del arrecife. La tasa de erosión de exclusiva responsabilidad de los erizos de mar supera el ritmo de acreción de carbonato cálcico en condiciones naturales, con lo que es previsible que estos arrecifes terminen pronto como sedimentos carbonatados.

Los episodios de ENSO menudean en unas regiones más que en otras; el desarrollo de los arrecifes de coral parece correlacionarse con esta frecuencia. La importancia del blanqueo, la tolerancia a los cambios ambientales y las características del ciclo biológico de los corales dominantes determinarán si un arrecife será capaz o no de recuperarse de estos desastres. A pesar de que el seguimiento es todavía parcial, los casos de blanqueo detectados parecen extenderse por todas las regiones arrecifales.

Los informes de blanqueo de corales en 1987 coincidieron con la preocupación por el caldeamiento global, y se pensó que los corales podrían ser un buen indicador de un incremento de la temperatura global



del océano, algo así como el canario que antiguamente avisaba a los mineros de la presencia de grisú en la mina. Aunque hasta el presente los datos no son concluyentes, por culpa sobre todo de la falta de datos históricos, ya se ha empezado un seguimiento preciso de los arrecifes coralinos del Caribe y de otras zonas.

Si las predicciones de aumento de la temperatura global en uno o dos grados que ha efectuado el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático tienen lugar en los próximos 50 años en las latitudes tropicales, las consecuencias para los arrecifes de coral pueden ser desastrosas, y no sólo desde el punto de vista ecológico. Muchos países en vías de desarrollo dependen de los arrecifes de coral para la obtención de alimentos, y han hecho grandes inversiones en instalaciones turísticas relacionadas con los arrecifes. Aunque, a diferencia de los mineros con el canario, no podamos relacionar todavía con seguridad el blanqueo con una causa concreta, no debemos ignorar el mensaje que nos dicta el blanqueo de los corales.

Astroenergía

Agujeros negros

¿Qué es lo que ocupa el centro de la galaxia, devora millones de estrellas, radia más que mil millones de soles y genera chorros de partículas que se extienden por miles de años luz? No habría astrónomo que no dijese que se trata de un núcleo galáctico activo (NGA) o, lo que viene a ser lo mismo, un agujero negro rodeado por una nube de gas en rotación. Sin embargo, casi tres décadas después del descubrimiento de los NGA, no salen los astrónomos de su perplejidad por lo que toca a la manera en que un agujero negro opera a modo de motor galáctico.

Se cree que los agujeros negros son los objetos más densos del universo, capaces de ejercer tales fuerzas gravitacionales, que todo lo que se les acerque demasiado quedará para siempre atrapado en ellos. La verdad es que ni siquiera hay todavía prueba directa alguna de que los agujeros negros existan. Pese a lo cual, los astrónomos han ido, durante los últimos años, consolidando la idea de que los agujeros negros son la fuente de energía de los NGA. "Cuesta trabajo imaginar que los NGA puedan recibir su energía de otra fuente", comenta John L. Tonry, del Instituto de Tecnología de Massachussets.

Tres son los argumentos a favor de los agujeros negros. En primer lugar, el brillo de los NGA varía en cosa de días; por tanto, la fuente de la energía del NGA no puede ser mayor que la distancia recorrida por la luz en ese tiempo. La fuente tiene que ser, pues, compacta y energética. En segundo lugar, podemos medir la velocidad a la que las estrellas se mueven alrededor de la fuente, y del valor obtenido calcular la intensidad de la atracción gravitacional de ésta y, por consiguiente, su masa. Por último, un NGA emite tanta radiación en un intervalo tal de longitudes de onda que no puede estar constituido por estrellas ordinarias (soles o estrellas gigantes). No hay mejor candidato que un agujero negro rodeado por una nube de gas, ya que puede radiar en casi todas las longitudes de onda, desde microondas hasta rayos gamma.

Basándose en esa razón triple, y en algún motivo más, se han hallado pruebas "muy convincentes" de la existencia de docenas de agujeros negros en núcleos galácticos activos. "Los astrónomos están en un 99,9 por ciento seguros de que los agujeros negros existen", dice Tonry. Comparte esa opinión el grupo encabezado por Tod R. Lauer, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, quien ha encontrado, gracias al laboratorio espacial Hubble, pruebas de la existencia de un agujero negro en la galaxia elíptica gigante M87. En julio del año pasado, John Kormendy, de la Universidad de Hawai, y Douglas Richstone, de la de Michigan, anunciaron el descubrimiento del que quizá sea uno de los mayores agujeros negros del universo. Su masa supera, en más de mil millones de veces, la solar.

Sabemos cómo calcular la conversión de energía gravitatoria de los agujeros negros en enormes flujos de radiación, pero desconocemos la causa de muchos detalles que nos confunden. Cuando el gas cae hacia el agujero, se acelera hasta casi la velocidad de la luz. La materia, como resultado de la fricción y de las fuerzas electromagnéticas, se calienta extraordinariamente, y en consecuencia radia con elevada intensidad. Un agujero negro transforma materia en energía con un rendimiento que decuplica de lejos el normal de las estrellas. Ahora bien, ¿cómo atrae la enorme cantidad de gas que su voraz apetito reclama, y cuál es el mecanismo que le permite generar largos chorros de partículas?

A lo largo de su vida, un agujero negro consume miles de millones de estrellas, o una cantidad equivalente de gas. El campo gravitacional de un agujero negro puede capturar estrellas o materia que vague por la galaxia. Los objetos así atrapados orbitan a cierta distancia alrededor del agujero. Este movimiento se mantendrá indefinidamente, a no ser que medie algún tipo de rozamiento.

Pero los astrónomos no son capaces de dar con un mecanismo que friccione tanto que cada año haga caer una estrella, o una cantidad equivalente de gas, en el agujero, y así durante mil millones de años.

Más suerte ha habido a la hora de explicar la formación de chorros. Según Roger D. Blandford y sus colegas, del Instituto de Tecnología de California, está íntimamente ligada a los campos magnéticos que se producen en las nubes de gas que giran en torno al agujero negro. Los campos magnéticos están retorcidos en la nube, retorcimiento que genera una fuerza contraria a la rotación del gas; éste pierde velocidad y cae hacia el agujero negro. Un viento electromagnético lo barre entonces, con lo que adquiere finalmente la forma de chorro.

La contrastación de esta teoría requiere un programa de observaciones, "todas ellas bastante difíciles", dice Blandford. Podrían hallarse indicios útiles resolviendo las estructuras más finas de los NGA mediante radiotelescopios. Desde hace poco, los teóricos disfrutan de la larga serie de preciosos datos que aporta el *Observatorio Compton de rayos gamma*. Los resultados de este satélite indican que los chorros de partículas de los NGA emiten radiación gamma y que sus partículas se mueven casi a la velocidad de la luz, lo que refuta algunas de las teorías sobre la creación de chorros más difundidas, y condiciona otras. "Estamos casi todos convencidos", señala Blandford, "de que obtendremos muchas más respuestas definitivas en los próximos cinco años".

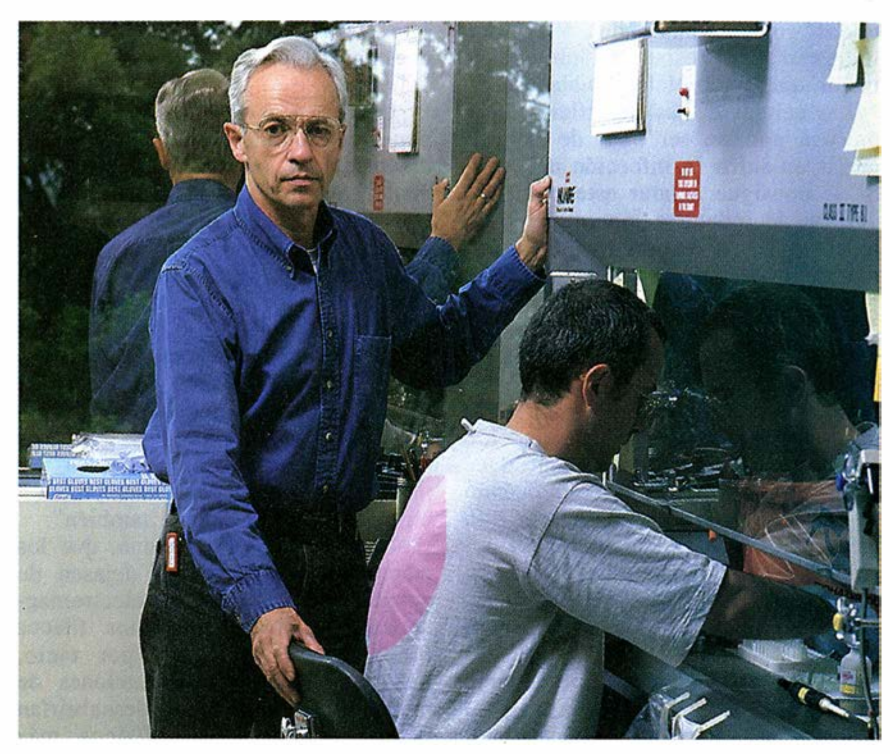
Inmunología

Cerco al sida

A lo largo de los últimos diez años de pandemia sídica hemos asistido también a un rosario de propuestas de vacunas que habrían de poner freno a esa plaga de nuestro tiempo. Todas se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, y está por ver su eficacia protectora contra

la enfermedad. En su inmensa mayoría, esos esbozos de vacuna se encaminan a provocar la producción de anticuerpos contra el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), el agente causal del sida. Los experimentos provisionales evidencian que algunas personas resisten a veces la infección del VIH. Ocurre, sin embargo, que esa capacidad para mantener a raya el virus del sida podría depender de un brazo especializado del sistema inmunitario, el que corresponde a la inmunidad celular.

Gene M. Shearer y Mario Clerici, del Instituto Nacional del Cáncer, han realizado un trabajo de notable interés, cuyos resultados recogen en un artículo publicado en el *Journal of Infectious Diseases*; explican allí que, en algunas personas, sus linfocitos *T* han respondido ante componentes del VIH, aun cuando los sujetos en cuestión no presenten anticuerpos contra el sida, ni estén infectados. Muy probablemente, la mayoría de tales individuos sí se halló expuesta al contacto con el virus VIH. Shearer y Clerici afirman que, en esos casos, las células *T* han hecho frente, con éxito, a la infección.



El sistema inmunitario podría ser capaz de enfrentarse con el virus del sida, afirman Gene M. Shearer y Mario Clerici, del Instituto Nacional del Cáncer.

Ni que decir tiene que se hallan sobreestimuladas las células productoras de anticuerpos en los pacientes VIH-positivos que tienen la infección en pleno desarrollo. Pero también las células responsables de la inmunidad celular están alteradas. Situación que Shearer y Clerici interpretan en el sentido siguiente: sólo en la hipótesis de que la inmunidad mediada por células falle, iniciará el sistema inmunitario la producción de anticuerpos, incapaces por lo demás de repeler la agresión del virus.

Si Shearer y Clerici andan en lo cierto, y existe una respuesta inmunitaria celular eficaz ante el sida, habrá que orientar la búsqueda de vacunas hacia las que estimulen el componente celular del sistema inmunitario. Que una vacuna avive o no la producción de anticuerpos podría ser una cuestión secundaria. Los investigadores aventuran incluso la idea de que la estimulación de la síntesis de anticuerpos podría ser contraproducente, porque podría dañar el componente celular de la inmunidad. Basan su opinión en estudios que indican que los dos componentes del sistema inmunitario podrían inhibirse entre sí.

Aunque el trabajo de Shearer y Clerici ha llamado la atención, nadie está dispuesto a olvidarse ya de los anticuerpos. "Me parece muy válida la idea de que haya individuos que han estado expuestos al virus en los que la infección no ha conseguido establecerse", dice Daniel F. Hoth, director del programa norteamericano sobre el sida del Instituto Nacional de Alergia y de Enfermedades Infecciosas (NIAID). "Acepto que Shearer y Clerici puedan detectar la memoria inmunológica del contacto con el virus. Pero eso no nos dice nada acerca del estado funcional de la respuesta celular; a lo mejor se trata de una mera respuesta inmunitaria parcial a una infección abortada."

La mayoría de las vacunas sometidas a prueba para determinar su inocuidad en voluntarios sanos se basan en proteínas puras, que estimulan la producción de anticuerpos. Ciertos ensayos en animales demuestran que una respuesta intensa de producción de anticuerpos inducida por vacunas protege al chimpancé frente al VIH. Pero desconocemos si podrá mantenerse un nivel adecuado de anticuerpos y si se ejercerá el mismo efecto en el hombre.

Margaret I. Johnston, subdirectora del programa NIAID, señala que incluso en el caso de vacunas que confieren protección eficaz contra otras enfermedades apenas se conocen los componentes centrales responsables de la inmunidad. La historia nos enseña que las vacunas que han tenido éxito han hecho uso de virus vivos atenuados o de mezclas de componentes, y no exclusivamente proteínas puras. "Me inclino a pensar que para que una vacuna sea eficaz ha de producir tanto una respuesta celular como otra de producción de anticuerpos", insiste Johnston.

Son ideas que se comparten entre los dedicados al desarrollo de vacunas: los nuevos productos se han diseñado, en ciertos casos, para estimular también la inmunidad celular. Los fabricados por Pasteur-Merieux (Lyon) y por Wyeth-Ayerst International (Filadelfia) utilizan virus modificados que incluyen componentes del VIH. Estos productos deberían inducir respuestas celulares, así como la propia síntesis de anticuerpos. (Bristol-Myers Squibb que había empezado ensayos clínicos con una vacuna de VIH basada en un virus de vaccinia modificado por ingeneniería genética —el mismo que se usa en la vacuna de la viruela— hubo de abandonarlos por obvias razones de seguridad.)

Jonas Salk, que desarrolló con éxito una vacuna contra la poliomielitis en los años cincuenta y está ahora empeñado en crear otra con VIH muertos, ha abrazado las ideas de Shearer y Clerici sobre la inmunidad celular. Pero son muchos los que recelan, por motivos de seguridad, de una vacuna hecha a partir del virus entero. Otros, más cautos, siguen derroteros alternativo; así, Therion Biologics, de Cambridge, está investigando el potencial de los "pseudoviriones", partículas consti-

tuidas con proteínas del VIH, que induzcan una respuesta inmunitaria mejor que las proteínas aisladas.

Las células de las superficies de la mucosa podrían ser unas de las primeras en sufrir la infección del VIH. Si se consigue aclarar este punto de que puede inducirse inmunidad frente al VIH, los laboratorios de vacunas tendrán que asegurar que sus productos protegen contra la infección por vía sexual, así como por vía intravenosa. Algunos resultados experimentales indican que los primates pueden ser inmunes al virus del simio análogo al VIH, conocido como VIS, cuando éste se introduce mediante inyección, pero no cuando se introduce por vía vaginal. Y, sin embargo, la inmunidad sexual es posible, al menos para el VIS, en el macaco. Preston Marx, del Laboratorio Regional de Investigaciones sobre Primates de Nuevo México, ha demostrado que pueden inmunizarse contra la infección por vía vaginal usando una vacuna de partículas víricas muertas.

Vida extrerrestre

¿Y si no conocen la radio?

Los teoremas matemáticos y las teorías físicas, ¿son verdades universales que cualquier especie de ente racional dada a ponderar la naturaleza de las cosas acabará, tarde o temprano, por descubrir? ¿O son creaciones de nuestra inventiva, como la mayoría de los elementos de nuestro patrimonio cultural y de las cosas que usamos?

La ambiciosa búsqueda de vida inteligente en el universo que ha emprendido la NASA podría arrojar alguna luz sobre ese viejo dilema. Se le ha dado el nombre de "Exploración de Microondas en Alta Resolución", eludiendo así las connotaciones, más cercanas a la fantasía científica que al rigor de la ciencia, de la antigua denominación "Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre" (proyecto más conocido por sus siglas en inglés, SETI). Su objeto: escudriñar el cielo a la caza de radioseñales extraterrestres.

Hasta ahora, la NASA ha dedicado dos telescopios al proyecto: la pantalla fija de 305 metros de Arecibo, en Puerto Rico, que está enfocada a un grupo de estrellas especialmente escogidas en un radio de cien años luz de la Tierra, y la pantalla móvil de 34 metros de Goldstone, California, que barre amplias franjas de cielo. La NASA espera continuar este trabajo durante diez años, con un coste total de cien millones de dólares.

¿Qué razones se esgrimen para suponer que alguno de estos instrumentos detectará señales de vida inteligente? Según Frank D. Drake, de la Universidad de California en Santa Cruz y veterano del SETI, los seres extraterrestres inteligentes tendrían "en esencia los mismos" sistemas de matemática y física de que nos valemos nosotros. "Muchas sociedades han hecho ciencia por su cuenta y riesgo, movidas a medias por la curiosidad, a medias por las ganas de crear una vida mejor", observa, "y pienso que, por las mismas razones, otras criaturas la harían también".

No sería posible, sostiene, que los científicos extraterrestres dejasen de descubrir la gravedad, el electromagnetismo y otros fenómenos físicos fundamentales. Podrían, por tanto, llegar a realizar comunicaciones de radio. Drake cree que descubrirían incluso los conceptos físicos más esotéricos, la teoría general de la relatividad, la teoría cuántica de campos o, por qué no, hasta las supercuerdas.

Este punto de vista es, según Nicholas Rescher, filósofo de la ciencia de la Universidad de Pittsburgh, "increíblemente localista; no dista mucho del afirmar que tendrían el mismo sistema legal o político que nosotros". Rescher opina que nuestra ciencia, nuestras matemáticas y nuestra tecnología son resultados irrepetibles de nuestra fisiología, nuestro sistema cognitivo y nuestro entorno. En verdad, prosigue, todo el programa SETI es "una pérdida de tiempo, dinero y energía". "Cabe perfectamente dentro de lo posible que haya otras civilizaciones, y cabe perfectamente dentro de lo posible que se comuniquen entre sí", añade. "Pero que lo hagan de la misma manera que nosotros, es tan probable, más o menos, como que hablen en inglés".

John D. Barrow, astrónomo de la Universidad de Sussex, mantiene un punto de vista intermedio. Barrow, autor de *Pi in the Sky*, donde analiza si las matemáticas se descubren o se inventan, cree que los extraterrestres compartirían con nosotros algunas ideas básicas subyacentes a la matemática y a la física, los conceptos de contar o de causa y efecto, por ejemplo. "Hay determinados rasgos del mundo que se imponen", afirma.

Pero a medida que la ciencia se aleja más de la realidad de cada día, observa Barrow, en su desarrollo quizá tengan más peso el azar y la ocasión, la sorpresa y la suerte. La teoría general de la relatividad, por ejemplo, no fue aceptada hasta el día en que se observó un eclipse solar que confirmó las predicciones de Einstein acerca de la curvatura de los rayos de luz. Si el Sol y la Luna no tuviesen, vistos desde la Tierra, casi exactamente el mismo tamaño, semejante observación no se habría podido llevar a cabo. En realidad, a Barrow le preocupa más la moral de los hombrecitos verdes que su ciencia. Si encontrásemos extraterrestres, ¿tendrían acaso algún principio análogo a la regla de oro: "trata a los otros como te gustaría que te tratasen a ti?"

Papiros del Qumrán

Evangelio de Marcos

En el invierno de 1946-47, tal vez buscando el alivio del oasis de Ain Fesja, hacia el noroeste del mar Muerto, tres jóvenes beduinos merodeaban aquellos parajes con sus rebaños. Vieron unas cuevas y decidieron explorarlas. Su decepción fue grande. En vez de encontrar unas codiciadas monedas de oro, hallaron sólo unos deteriorados legajos de viejos pergaminos con escrituras desconocidas (hebreo y arameo). Así comenzó la época de los grandes descubrimientos del mar Muerto. Actualmente las cuevas exploradas son once. En ellas se han encontrado importantes fragmentos del Antiguo Testamento, así como textos relacionados con la vida de los esenios. Hallar en aquellas cuevas un papiro evangélico tiene una importancia extraordinaria, por cuanto se trata de un testigo de la primera transmisión neotestamentaria.

Hace ya unos veinte años, identifiqué un papiro del evangelista Marcos en la cueva 7 de Qumrán. Estaba componiendo una lista de los papiros de los *Setenta*. (Así se llama la traducción griega que los Setenta Intérpretes hicieron del texto hebreo del Pentateuco —los cinco primeros libros de la Biblia: Génesis, Exodo, Levítico, Números y Deuteronomio—; otros autores desconocidos la hicieron de los restantes libros veterotestamentarios.) Con ese trabajo quería colmar una laguna en el campo de los estudios papirológicos, y tuve que adentrarme en la cueva 7 de Qumrán, pues en ella E. -M. Boismard y P. Benoit habían identificado dos papiros griegos del Antiguo Testamento. Por aquellos años —sin ayuda de la informática— era como

una distracción el identificar pequeños fragmentos de papiro publicados como anónimos. Así pues, al entrar en la cueva, vi otros trozos de papiro, entre los que me llamó particularmente la atención el inventariado con el número 5 (cuya sigla es 7Q5; 7Q = cueva 7 de Qumrán y 5, número de inventario). Las medidas de este papiro son de 2,7 x 3,9 cm.

Como acertadamente sugirieron los autores de la edición príncipe de los papiros de dicha cueva séptima, éste parecía un fragmento de una genealogía veterotestamentaria, pues en él se leían con toda claridad las letras *nnes*, que podrían fácilmente proceder del verbo griego *egennesen* (: "engendró"). Recorrí los innumerables pasajes del Antiguo Testamento con genealogías, y no logré dar con ningún pasaje genealógico que cuadrase a los restos paleográficos del papiro. Se me ocurrió que tal grupo de letras podría formar parte del nombre geográfico Gennesaret, palabra que con grafía similar se encuentra solamente una vez en todo el Antiguo Testamento, en el primer libro de los Macabeos (11,67). Mi sorpresa fue mayúscula cuando hallé que 7Q5 contenía un fragmento del evangelio de Marcos, concretamente 6,52-53.

No quise dar crédito al hallazgo. No creía posible hallarme frente a un papiro marcano del año 50 (datación dada al fragmento por el paleógrafo de Oxford C. H. Roberts). Redacté el correspondiente artículo, que se publicó en la revista *Biblica*, órgano del Pontificio Instituto Biblico de Roma. El fragmento de Marcos, transcrito, reza así:

[synekan] e[pi tois artois] 20 letras
[all'en au]ton e [kardia peporo-] 23
[men]e. Kai ti[aperasantes] 20
[elthon eis Ge]ennes[aret kai] 21
5 [prosormis]thesa[n. Kai exel-] 21

La traducción es la siguiente:

"6[52] [pues no se habían dado cuenta] sobre [los panes, sino que] el [corazón] de ellos estaba embotado. [53]Y habiendo hecho la travesía, [llegaron a] Genesaret [y desembarcaron]".

En la cueva 7, todos los trozos hallados conservan escritura en griego, lo cual contrasta con la inmensa mayoría de los manuscritos encontrados en las otras cuevas de Qumrán, cuyos pergaminos nos han transmitido textos en hebreo y arameo. Además —y esto es de suma importancia cronológica—, en la cueva 7 hay sólo papiros y escritos exclusivamente por una cara, lo cual acredita que se trata de rollos y no de códices (es decir, lo equivalente a nuestros actuales libros). El paso del rollo al códice (con el fin de ahorrar papiro) se hizo hacia el año 80 de nuestra era. Luego, este dato arqueológico aboga por su antigüedad.

Veamos, con algún pormenor, la condición del papiro 7Q5. En primer lugar, nos interesa la esticometría, es decir, el número de letras por línea, que es el mismo que en los precedentes papiros identificados del Antiguo Testamento. Esta semejanza de regularidad esticométrica es muy favorable a la identificación, pues indican que están en sintonía con el modo de escribir de los otros escribas que copiaron los textos del Antiguo Testamento y responden a una misma costumbre o pauta de transcribir manuscritos. Conviene recordar que en los manuscritos literarios de la época greco—romana, las palabras se escribían en columnas, sin separación de letras ("scriptio continua"); el margen derecho quedaba así convenientemente justificado. Solamente se dejaba un espacio en blanco cuando había cambio de sección, lo cual puede observarse en la línea 2 del 7Q5, en la que pasa del versículo 52 al 53. Se debe, además, notar que en este papiro el nuevo período comienza con la conjunción *kai* (: "no") improcedente en un autor clásico, pero común en el estilo de Marcos.

Es verdad que en mi identificación ha habido una cierta discusión en la interpretación de algunas letras, lo cual no es de extrañar, pues los papiros no llegan siempre en perfectas condiciones de lectura. Y concretamente los de la cueva 7 nos han llegado muy deteriorados. C. P. Thie-



Texto del evangelio de Marcos encontrado en Qumrán

de opina que no existe verdadera discrepancia entre la lectura de la edición príncipe mencionada ("edición príncipe" designa aquella en que por vez primera se publica un manuscrito) y la del que suscribe. Solamente había un punto de verdadera oposición (en la línea 2), que ahora ha quedado resuelto. Se trata de la *n* (todo el papiro está escrito con mayúsculas, y la n griega mayúscula es como la nuestra, es decir, N), a la que se oponían diversos impugnadores: Baillet, Boismard, etcétera. Porque decían que en esta parte, la más deteriorada del papiro, el palo vertical que se detectaba no era el izquierdo de una N, sino una I, con lo cual, en vez de leerse *auton* (: "de ellos"), se tenía que leer *autoi* (: "para él"). De este modo, se debía aparentemente descartar la atribución a Marcos. (Sin embargo, dada la coincidencia de todas las otras letras, era casi imposible que fuera una I.)

Pero, aparte de ello, el 12 de abril de 1992 este papiro fue inspeccionado por el Departamento de Identificación y Ciencia Forense de la policía nacional de Israel. Después de este análisis, se advierte que el palo vertical cuestionado es efectivamente el palo izquierdo de una N, pues en su punto superior se ve una parte del trazo oblicuo descendente de una N, con lo cual queda excluida absolutamente la I.

La aceptación de nuestra identificación encontraba particular resistencia por culpa, sobre todo, de cierta singularidad fonética. En el papiro hay un cambio de consonantes dentales: d → t (se lee *tiaperasantes* en vez de *diaperasantes*). A un papirólogo esto no le llama la atención en lo más mínimo. Es una alternancia frecuente aun en los papiros literarios. Además, hay una confirmación epigráfica —de más valor que el testimonio de un papiro, en cuanto que sobre piedra se escribía con más atención, pues eran inscripciones que debían perdurar—, que indica que este cambio era familiar a los habitantes de Jerusalén por la época de nuestro papiro. En la grandiosa reconstrucción del templo, Herodes había hecho poner una inscripción griega en el segundo recinto, prohibiendo, bajo pena de muerte, el acceso a todos los no judíos. Flavio Josefo nos habla de ello en la *Guerra judía* 5,5,2 y 6,2,4, y en las *Antigüedades judías* 14,11,5. Una piedra con tal tipo de inscripción fue hallada en el siglo pasado. En ella la palabra que significa "separación, paso cerrado" está escrita con t en vez de d, pues se lee *tryphaktos* en vez del correcto *dryphaktos*.

Hay otra pequeña dificultad de crítica textual. Con respecto al texto común, en el papiro se omiten *epi ten gen* (: "a tierra") después de *diaperao* (: "atravesar, hacer una travesía"). El texto ordinario en griego de este pasaje se traduce así: "habiendo hecho la travesía hacia la tierra". Además, este verbo no exige necesariamente un complemento local; el papiro marcano más antiguo hasta el presente (el Chester Beatty, del siglo III), en 5,21 omite *eis to peran* (: "a la otra orilla") después de *diaperao*, contra la lectura ordinaria de los manuscritos más recientes. Tal vez, sea conveniente recordar que en crítica textual interna o racional hay un principio que reza *lectio brevior, potior* (: "la lección más breve, es preferible"). A mayor abundamiento, las veinte letras de 7Q5, por confirmación de un programa de informática, sólo corresponden a Mc 6,52-53.

Creo oportuno prestar alguna atención a un punto que puede crear cierta dificultad en la mentalidad de los no iniciados en la ciencia papirológica. Y es éste: la pequeñez del fragmento 7Q5 parece abogar por la imposibilidad de llegar a una identificación válida. A esto se puede responder de dos maneras. La primera es que, si una hipotética identificación no es la verdadera, no se dará la adecuada verticalidad de las letras en las otras líneas del contexto literario (recuérdese que se escribía en columnas y en "scriptio continua"). La segunda es que fragmentos bíblicos —no hablo ya de los literarios en general— más insignificantes que el 7Q5 han sido aceptados sin ninguna dificultad. La razón de su fácil acogida es que no implican consecuencias innovadoras.

Parecen, pues, justificadas las palabras de Thiede: "De acuerdo con las normas del trabajo paleográfico y crítico-textual, resulta que 7Q5 es Mc 6,52-53, el fragmento más antiguo que tenemos de un texto neotestamentario, escrito alrededor del año 50, con toda seguridad antes del 68". (José O'Callaghan, del Pontificio Instituto Bíblico.)

Escher y Penrose

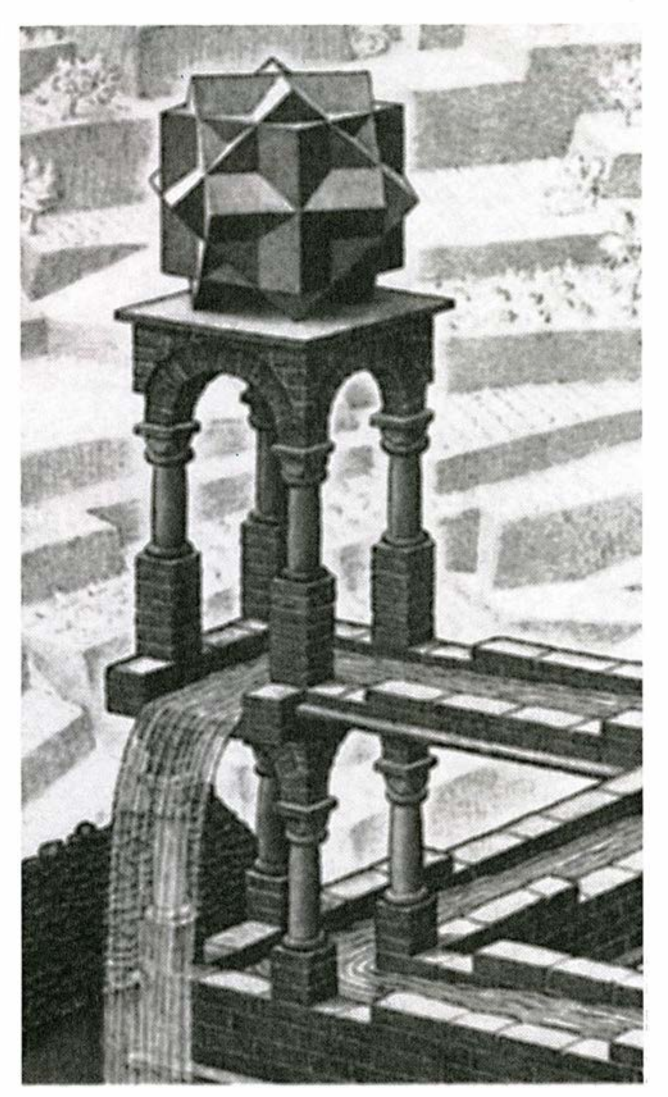
Junto a la Cascada

Roger Penrose, hoy profesor de la Universidad de Oxford, no era más que un posgraduado de 23 años cuando se topó con el geométrico arte de Maurits C. Escher. Aconteció con motivo de un congreso de matemáticas celebrado en Amsterdam en 1954. Desde entonces, este físico y matemático británico parece haber compartido con el artista holandés, ya fallecido, lazos misteriosos que trascienden del espacio y el tiempo.

Lo mismo que tantos matemáticos, Penrose sintióse fascinado por la lúdica exploración que Escher efectúa en nociones matemáticas como la simetría y la regresión infinita, y por las manipulaciones a que somete la geometría y la perspectiva para construir objetos "imposibles" que infringen las reglas de la realidad tridimensional. Los dibujos de Escher inspiraron a Penrose el esbozo de un objeto imposible de cosecha propia, una "tribarra" compuesta por tres listones ensamblados. La tribarra no tiene nada de especial a primera vista, pero al dibujar los listones que la componen nos percatamos de que éstos —¿o tal vez el espacio mismo?— han de estar retorcidos.

Penrose le mostró la tribarra a su padre, Lionel, distinguido profesor de genética, de quien Roger ha heredado el gusto por paradojas y rompecabezas. Lionel respondió dibujando una escalinata imposible, que parece ascender sin fin, pero que en realidad se muerde la cola, cerrándose sobre sí misma. Padre e hijo prepararon conjuntamente un artículo donde describían la tribarra y la escalinata, y se lo enviaron a Escher. El artículo, publicado en el *British Journal of Psychology* en 1958, espoleó a Escher para crear dos de sus litografías más famosas: *Ascending and Descending* (Ascenso y Descenso), en el que una procesión de monjes suben y bajan en fila por una escalinata sisífea, y *Waterfall* (Cascada), que transforma la tribarra de Penrose en un circuito de agua que corre sin cesar.

La historia se reanudó tres decenios después, en mayo de 1991, cuando Penrose asistió en Copenague a un congreso de física cuántica. Allí acudió a la disertación del físico Asher Peres, de la Universidad Technion de Israel, que trataba sobre teorías de variables ocultas. Tales teorías quieren explicar desde la física clásica ciertos efectos cuánticos como la no-localización: las partículas que emite una fuente común están correlacionadas sin que haya entre ellas transmisión alguna de información (ni la propia correlación puede ser empleada para comunicarlas). Apelan para ello a propiedades indetectables. Peres ofreció una nueva demostración, más breve y manejable que la original, de un conocido teorema



Un poliedro cuántico adorna una de las torres de "Cascada", de Escher.

mirándome inexpresivamente", rememora Penrose, "así que opté por trazar unas cuantas figuras, para ver si tenían sentido." Y al ir Penrose representando las coordenadas de Peres, fue tomando forma en el papel un poliedro complejo, compuesto por tres cubos que se interpenetran, girado cada uno de ellos 90 grados con respecto a los demás. "Lo estuve mirando", dice Penrose, "y pensé, ¡caramba, esto ya lo he visto antes!" Se acordó de pronto: Escher había colocado justamente un poliedro así sobre la torre izquierda de su "cascada". El curioso hallazgo de Penrose quedará recogido en un volumen de artículos que va a ser publicado en memoria de John Bell, gran teórico de la mecánica cuántica. Desdichadamente, Penrose no puede esta vez enviarle el artículo a Escher, pues el artista murió hace 20 años.

(llamado en honor a sus autores de Kochen-Specker) que demuestra la incoherencia interna de toda una clase de teorías de variables ocultas. En la versión de Peres, el teorema dice que hay treinta y tres vectores tridimensionales tales, que no puede asignarse sin contradicción el valor 1 a un vector de cada tríada ortogonal que se forme con ellos y el valor 0 a los otros dos. Pues bien: las teorías de variables ocultas de cierta clase se basan en asignaciones de ese tipo; no son, pues, coherentes. Los treinta y tres vectores son aquellos cuyos cosenos directores al cuadrado valen (0,0,1), (0,1/2,1/2), (0,1/3,2/3), (1/4,1/4,1/2), o cualquier permutación de estas ternas (los vectores opuestos se cuentan sólo una vez).

Penrose, que acostumbra a visualizar conceptos dándoles expresión geométrica, le preguntó a Peres si sus coordenadas se correspondían con poliedros interesantes. "Se quedó

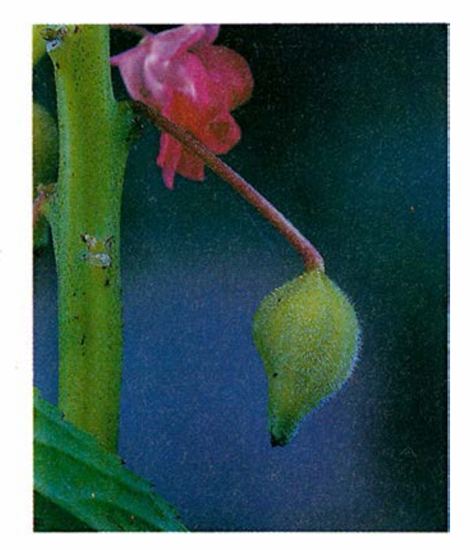
Penrose sí llegó a conocer a Escher, con quien se reunió en una ocasión, en 1962. "Estaba yo viajando en automóvil por Holanda, y se me ocurrió telefonearle; Escher me invitó a tomar té en su casa", recuerda Penrose. Le propuso a Escher un rompecabezas: un conjunto de polígonos idénticos que adecuadamente adosados pudieran teselar el plano infinito. Escher resolvió el problema más adelante; la clave consistía en darle la vuelta a ciertos polígonos, convirtiéndolos así en sus imágenes especularmente simétricas. En 1971, justo antes de fallecer, Escher dibujó una figura que se inspiraba en el rompecabezas.

El encuentro resultó un poco decepcionante en un aspecto. "Me esperaba que su casa tuviera una escalera que saliese por una ventana, o algo por el estilo", señala Penrose. "Pero todo era de una pulcritud y organización perfectas".

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Semillas de balsamina



La balsamina, una planta arraigada en mi Oriente natal, recibe en ciertos lugares de Occidente el nombre de *noli me tangere*, es decir, "no me toques", porque, al primer roce, salen disparadas las semillas. Tan gráfica denominación se ha convertido incluso en epíteto de especie de cierto *Impatiens* pirenaico, género de la familia de las balsamináceas, integrada por medio millar de especies distribuidas por casi todo el mundo.

Son plantas que aman los bosques caducifolios, con muestras de singular belleza en las alturas del Himalaya; algunas medran junto a los torrentes y quebradas de los valles. Presentan flores zigomorfas, o de simetría bilateral, formadas por tres sépalos libres y cinco pétalos, algunos soldados. Del cáliz procede un largo y delgado espolón coloreado. El androceo consta de cinco estambres, de filamento corto; el ovario, súpero, nace del ensamblamiento de cinco carpelos y origina un fruto capsular. Las hojas suelen ser lanceoladas, con el limbo dentado.

Los europeos se han enamorado de los colores vistosos de nuestras variedades japonesas, y es frecuente verlas aclimatadas adornando sus jardines. Pueden los aficionados a la fotografía obtener el mismo resultado que logré yo si colocan el sensor y el ángulo de la máquina centrados en las semillas eclosionantes. Verán, además, contra la creencia general, que las partes del fruto no salen despedidas en todas las direcciones, sino que se proyectan en un sentido preferente.



Foto de la derecha
distancia focal: 80 mm
diafragma: F = 32
exposición: 1/25.000 de segundo
película: ISO = 100



Protohistoria de la Tierra

Las técnicas de datación radiactiva iluminan vastos períodos de la historia geológica, que dejan ver las fases primitivas de la evolución de la Tierra

Derek York

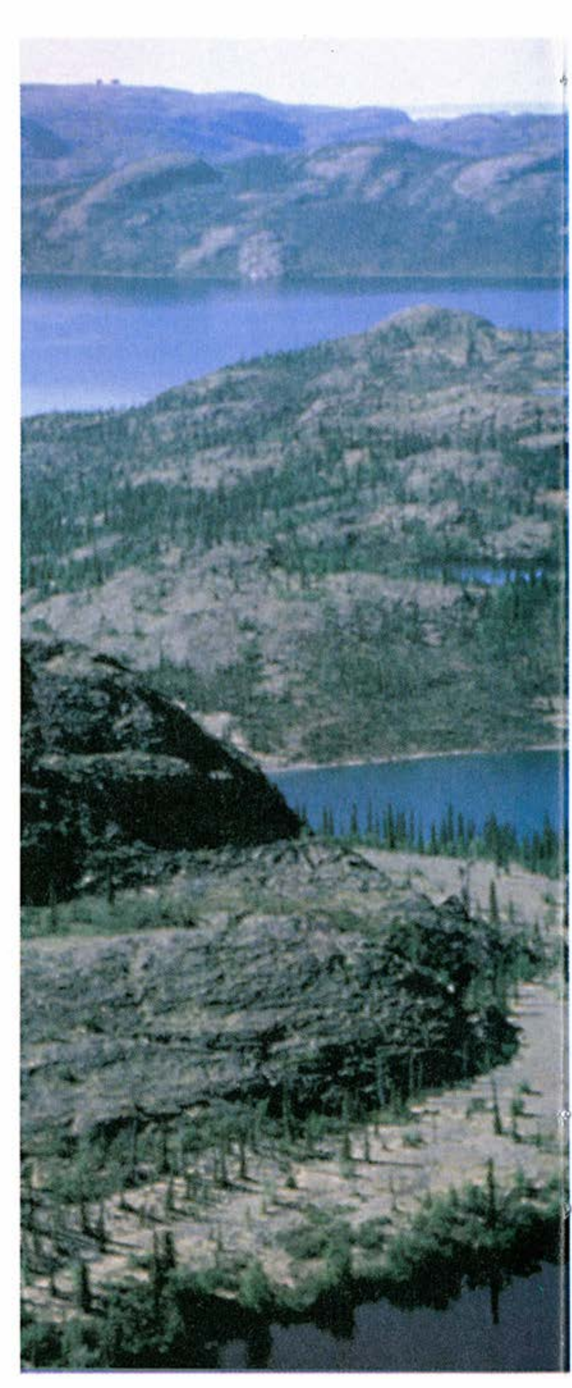
La datación radiactiva proporciona un poderoso instrumento para medir el tiempo geológico. Ha revelado el ritmo general de la evolución de la Tierra y ha permitido cifrar la edad de nuestro planeta entre cuatro mil y cuatro mil quinientos millones de años. No obstante, las fases primitivas de la historia terrestre, en las que el planeta adquirió su gran núcleo de hierro y los livianos y móviles continentes, se han resistido a una investigación fácil debido a los numerosos procesos que hacen reiniciar el reloj radiactivo. A medida que los continentes derivan sobre la superficie, el lecho oceánico que los separa se recicla en el fondo ígneo, y surgen plegamientos montañosos allá donde los continentes colisionan. La ardiente materia subyacente invade las rocas continentales y puede irrumpir al exterior, liberando lava que recubre el terreno. La erosión, por fin, aplana las montañas y arrastra hasta las fosas oceánicas los sedimentos, donde también ellos retornan al manto.

Utilizando técnicas de creciente refinamiento, los geólogos están extrayendo de rocas antes mudas una jugosa narración de los primeros pasos de la historia terrestre. El examen de minerales arcaicos revela cuándo aparecieron los primeros continentes y cuál era su extensión. Asimismo, se descubren pruebas de que la tectónica de placas se ha comportado a lo largo de casi toda la vida de la Tierra de manera muy semejante a la actual, en contra de lo que sostenían ciertas teorías. Los recientes descubrimientos aportan detalles, durante tanto tiempo en el misterio, de los años formativos en que nuestro planeta adquirió sus rasgos característicos.

Para descubrir pistas sobre la naturaleza de la Tierra en su juventud, los geofísicos se valen de un conjunto de métodos de datación radiactiva. Presentan éstos diferentes puntos fuertes y débiles, pero todos ellos se basan en la determinación de la concentración relativa de un isótopo radiactivo y del isótopo subsiguiente, o núcleo hijo, en el cual se transforma por desintegración. Cada isótopo radiactivo termina por convertirse en un producto de desintegración final y estable; conociendo la velocidad de dicha transformación nuclear (medible con alta precisión en el laboratorio) puede inferirse el tiempo que han estado acumulándose productos de desintegración en la roca. Esta información, acompañada de otras pruebas, revela mucho sobre la historia geológica.

En la presente búsqueda de los restos continentales más antiguos, se investigan ante todo los isótopos del uranio. Este termina por desintegrarse en plomo, razón por la cual la correspondiente técnica de datación se denomina método del uranio-plomo. Su gran ventaja proviene de que, habitualmente, puedan extraerse de los cristales de circón muestras de uranio y plomo de tamaño suficiente para ser analizadas. Estos cristales aparecen muy a menudo en las rocas graníticas y metamórficas, así como en otras volcánicas y en material sedimentario procedente de alguna de aquellas clases de rocas. Los circones son, además, muy resistentes al calor y a la intemperie, de modo que pueden sobrevivir intactos en rocas que hayan experimentado uno o más episodios metamórficos.

DEREK YORK se ha dedicado, desde hace más de treinta años, al perfeccionamiento de los instrumentos que utiliza la geocronología para investigar el pasado remoto de la Tierra. Tras doctorarse en la Universidad de Oxford en 1960, ingresó contratado en el departamento de física de la Universidad de Toronto.



1. GNEISS DE ACASTA, grupo de rocas metamórficas en el norte del Canadá;

Una posible dificultad del método de datación de uranio-plomo estriba en lo siguiente: al estar las rocas sometidas a calentamiento y compresión sumamente intensos pueden perder parte importante de su plomo, con lo cual vuelven a iniciar el reloj radiactivo. En 1956, George W. Wetherill, de la Institución Carnegie de Washington, mostró una manera de salvar este obstáculo. Su procedimiento se basa en la existencia de dos isótopos radiactivos del uranio, el uranio 238 y el uranio 235. Cada uno de ellos sigue su propia secuencia de desintegración: el uranio 238 termina en plomo 206, y el uranio 235, en plomo 207. Por consiguiente, puede estimarse la edad de cualquier mineral que contenga uranio a partir de esas dos fuentes.

Wetherill midió las dos relaciones de abundancia uranio-plomo de muchísimas muestras y representó una en función de la otra. En la gráfica, las muestras sin perturbar, y que por tanto sean relojes perfectos, caerían sobre una curva continua que Wetherill llamó curva de concordia. (La curva se limita a reflejar que el uranio 235 y el 238 se desintegran a un ritmo continuo y previsible.)

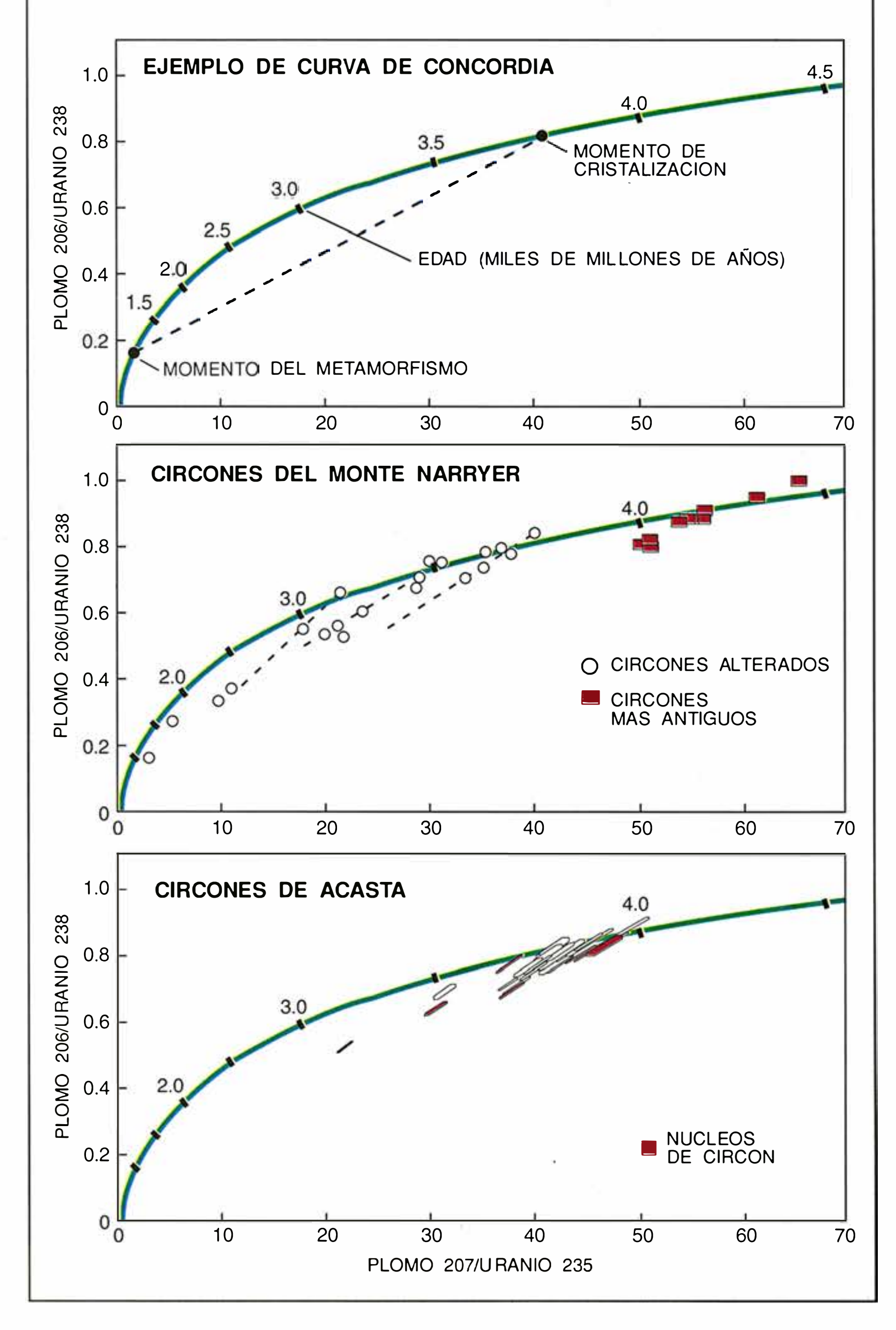
Wetherill halló luego algo más. Determinaba, mediante la representación de los cocientes de concentración, la edad común de un grupo de muestras de roca, aun cuando éstas hubieran perdido gran parte de su plomo durante episodios metamórficos. Su método da buen resultado porque los plomos 206 y 207 son químicamente idénticos, con lo cual habrían escapado de las rocas fracciones idénticas de uno y otro isótopo. Al medir e inscribir los cocientes de concentración entre uranio y plomo en esas rocas, los puntos correspondientes a las diversas muestras



constituyen la parte intacta más antigua que se conoce de la superficie de la Tierra. La datación radiactiva fija en casi 4000 millones de años su edad, señal de que al poco de la formación de la Tierra ya existía algún material continental.

La datación por uranio-plomo

Los circones contienen dos isótopos radiactivos del uranio: el uranio 235, que se desintegra en plomo 207, y el uranio 238, que lo hace en plomo 206, algo menos pesado. En circones sin perturbar, la comparación gráfica de las dos concentraciones de uranio-plomo dibuja la curva de concordia, cuyos puntos indican la edad de cada muestra considerada. Los datos obtenidos para circones que sufrieron un episodio metamórfico, y por tanto perdieron parte de su plomo, caerán sobre una recta que corta a la curva de concordia en dos puntos (*arriba*). El punto superior representa el momento en que las rocas cristalizaron originariamente; el más bajo señala el instante del metamorfismo. Los circones del monte Narryer, en Australia, muestran todos señales de perturbación (*centro*). Juzgando por sus posiciones en la curva de concordia, los circones más antiguos del monte Narryer parecen tener entre 4100 y 4200 millones de años de antigüedad; los demás forman tres familias de 3100, 3300 y 3750 años de antigüedad. Basándose en un razonamiento similar, los circones de los gneiss de Acasta habrían cristalizado hace unos 3960 millones de años (*abajo*).



caen sobre una recta situada por debajo de la curva de concordia. Los puntos extremos en que esta recta corta a la curva de concordia representan el momento de cristalización y el momento de metamorfismo.

Puede resultar difícil la aplicación a los circones del método uranio-plomo, ya que los cristales de circón suelen tener una estructura laminar, con un núcleo original recubierto de depósitos minerales posteriores. En los años setenta, Thomas E. Krogh, del Real Museo de Ontario en Toronto, mostró la manera de raspar circones para separar sus núcleos; señaló asimismo que las relaciones uranio-plomo de las muestras a menudo caen sobre la curva de concordia de Wetherill. Krogh llegó a la conclusión de que la parte interior de los circones no había sufrido alteraciones químicas, por lo que todavía registraba el tiempo transcurrido desde la primera cristalización del mineral.

Durante los años ochenta, William Compston y Steve Clement, de la Universidad Nacional Australiana en Canberra, avanzaron un paso más en la datación de circones. Abandonaron la práctica habitual de analizar de entrada el núcleo entero y se aprestaron a estudiar la composición y de ahí la edad del circón en multitud de puntos. Para ello construyeron un dispositivo capaz de lanzar sobre una muestra un haz muy focalizado de átomos de oxígeno ionizados, o cargados eléctricamente. (El haz medía 25 micrometros de anchura.) Compston y Clement llamaron a su instrumento SHRIMP (*camarón*), iniciales de Super High-Resolution Ion Micro-Probe, microsonda iónica de superalta resolución. Apuntando el SHRIMP a un punto de la cara interior de un cristal de circón cortado en dos mitades, los iones vaporizan los átomos de uranio y plomo que surgen de ese punto; dichos átomos atraviesan después un espectrómetro de masas, para su separación y recuento.

A partir de 1983, el SHRIMP ofreció nueva y valiosa información sobre la edad de la corteza terrestre. Derek O. Froude, de la Universidad Nacional Australiana, que colaboraba con Compston y otros, fue probando cristales de circón en cuarcitas, o areniscas metamórficas del monte Narryer, en Australia occidental. Anteriores trabajos habían revelado que esta región contiene rocas de unos 3600 millones de años de antigüedad. El grupo de Froude analizó veinte cristales de circón extraídos de una muestra de roca. Cuatro de

ellos dieron relaciones plomo a uranio que indicaban edades de 4100 a 4200 millones de años.

Hasta entonces, las más antiguas muestras de materia terrestre conocidas, tomadas del suroeste de Groenlandia, habían sido datadas por Stephen Moorbath y su equipo de la Universidad de Oxford, en 3800 millones de años. Los 16 circones restantes dieron unas relaciones isotópicas agrupadas en torno de tres rectas que cortaban a la curva de concordia en edades de unos 3750, 3300 y 3100 millones de años respectivamente.

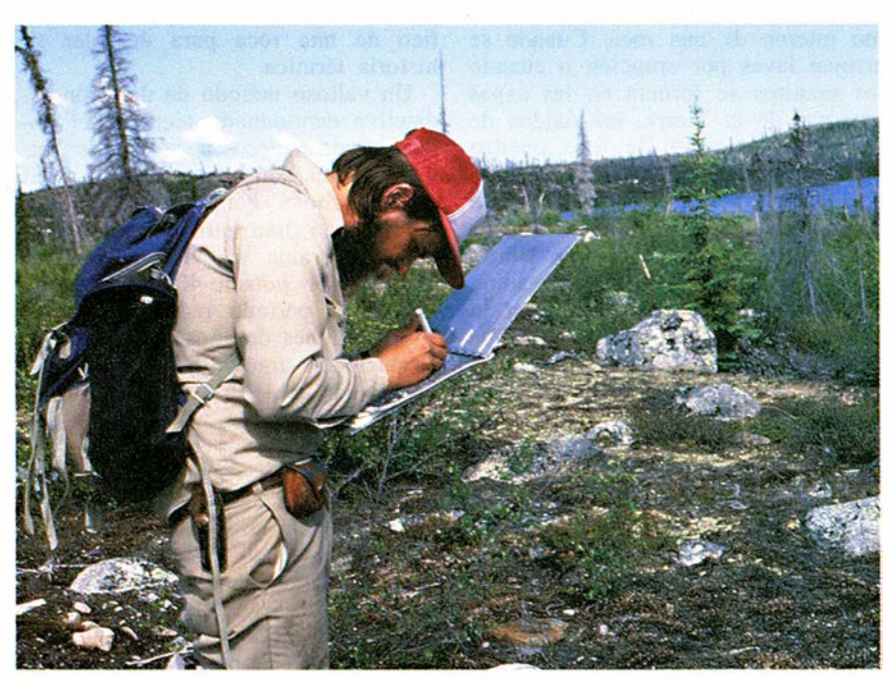
De ello dedujo Froude que los circones de 4100 a 4200 millones de años, así como las muestras de 3750 millones de años, se formaron mucho antes de incorporarse a las rocas sedimentarias circundantes. Los circones se habían desprendido por erosión de su roca madre y fueron a parar a sedimentos que más tarde, sometidos a calentamiento y presión muy extremados, se convirtieron en las cuarcitas del monte Narryer. Los circones más jóvenes, de 3300 y 3100 millones de años, comenzaron probablemente a formarse durante el período de metamorfismo. Como los circones se encuentran en proporción muchísimo mayor en las rocas continentales que en las oceánicas, el descubrimiento de los australianos avala la idea de que hace más de 4000 millones de años ya existía al menos alguna materia continental. Por desgracia, los circones parecen ser las únicas reliquias supervivientes de esas venerables rocas.

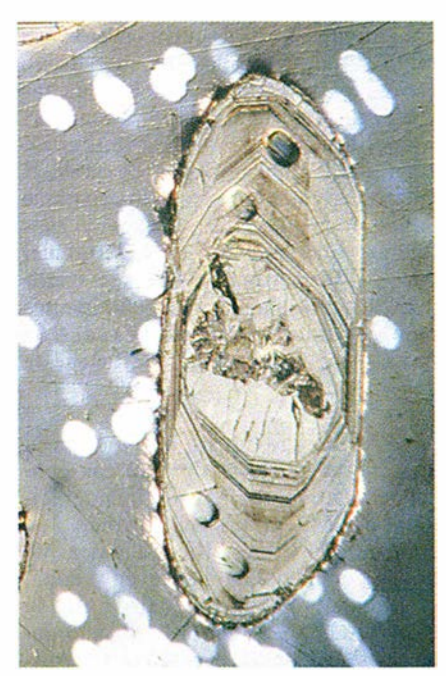
En 1989, Samuel A. Bowring, entonces en la Universidad de Washington, junto con Ian S. Williams, de la Nacional Australiana, y el propio Compston, demostró la existencia de rocas intactas casi tan antiguas como los circones australianos. Para ello aplicaron el SHRIMP a circones de los gneiss de Acasta, zona de rocas metamórficas situada al sureste del lago Gran Oso en los Territorios del Noroeste canadiense. Bowring y sus colegas habían empleado con anterioridad la técnica de abrasión de Krogh para determinar que ciertos circones de los gneiss de Acasta tenían más de 3800 millones de años, y sospechaban que dentro de los circones individuales se escondía la prueba de antigüedades todavía mayores, cosa que tal vez pudiera comprobarse por medio del SHRIMP. Con esa idea, Bowring voló hacia Canberra llevando circones procedentes de dos muestras de rocas de Acasta.

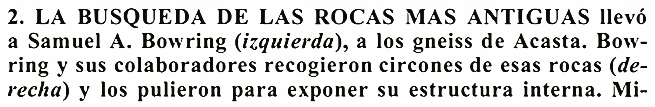
Se exploraron allá un total de 82 puntos en 53 circones, obteniendo de las dos muestras unas relaciones uranio-plomo que sobre el diagrama de Wetherill se abrían en abanico, próximas a la curva de concordia. Una de ellas se situaba entre 3600 y 3960 millones de años, y la otra entre 3800 y 3960 millones de años. Bowring y sus colegas sacaron en conclusión que los circones más antiguos registraban la edad de cristalización original de las rocas. La dispersión de los datos obtenidos parece indicar que los circones sufrieron al menos dos episodios metamórficos: uno dentro de los primeros centenares de millones de años después de la cristalización y otro ocurrido hace unos dos mil millones de años.

Si tal interpretación es correcta, el gneis de Acasta es resto metamórfico de la roca sólida intacta más antigua que se conoce en la superficie terrestre. Los geólogos han identificado otras rocas, casi tan antiguas, en Groenlandia, Labrador y Australia occidental. Lance P. Black, del Departamento de Recursos Minerales en Canberra, y otros expertos han informado recientemente del descubrimiento, también mediante el SHRIMP, de circones de 3870 millones de años en la Antártida.

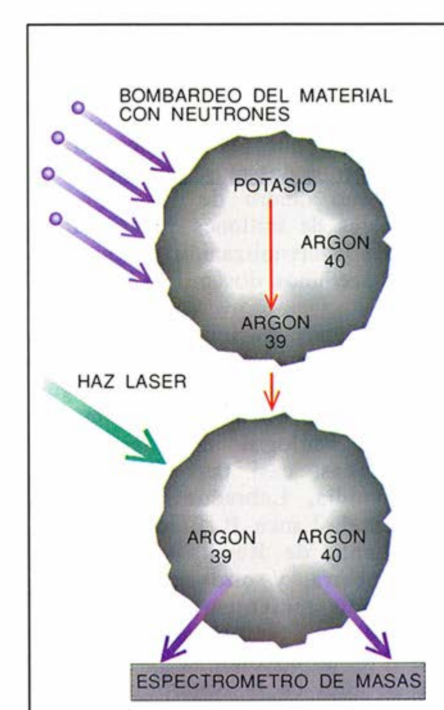
Tras los anteriores resultados caben pocas dudas de que existieran al menos pequeñas extensiones de rocas continentales sobre la superficie terrestre en los primeros 700 millones de años de su historia. Impresiona, además, la increíble escasez de rocas con más de cuatro mil millones de años de edad en la corteza. La tectónica de placas no basta por sí sola para explicar la rareza de tales rocas. Quizá la Tierra poseía una extensa corteza primigenia, luego destruida y vuelta a mezclar con los materiales





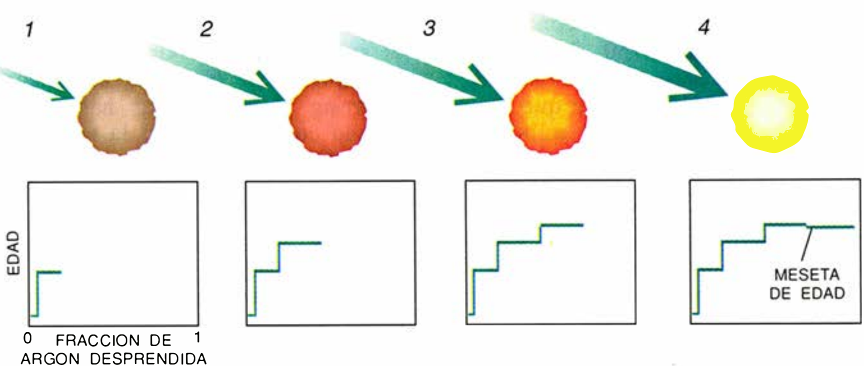


2. LA BUSQUEDA DE LAS ROCAS MAS ANTIGUAS llevó a Samuel A. Bowring (*izquierda*), a los gneiss de Acasta. Bowring y sus colaboradores recogieron circones de esas rocas (*derecha*) y los pulieron para exponer su estructura interna. Midieron después la relación de plomo a uranio en varios puntos de los circones para encontrar las partes más antiguas. Los hoyuelos fueron producidos por haces de iones para vaporizar los trozos de cristales de circón que se analizaron.



Láser para iluminar el pasado

El calentamiento escalonado por láser ofrece una manera eficaz de medir la edad y la historia térmica de una muestra de mineral. Dentro de este enfoque, la edad se mide por el grado de desintegración del potasio radiactivo en argón 40. En un primer paso, la muestra se bombardea con neutrones, que transforman parte del potasio en argón 39 (*izquierda*). Un intenso haz láser calienta la muestra y hace que se desprendan los dos isótopos de argón; un espectrómetro de masas mide la concentración exacta de uno y otro. A medida que aumenta el calor del láser, se desprende cada vez más argón (*etapas 1-4, centro*); en cada etapa se obtiene una edad a



del interior por el impacto de meteoritos gigantes, restos de la formación de planetas. Tal rotura habría sido favorecida por una convección intensa, creada por el enorme calor interno del planeta recién formado, que desgajaría bloques de rocas continentales y ahondaría los sedimentos en las ardientes profundidades.

Por otro lado, los indicios geoquímicos dan pruebas crecientes de que, cuatro mil millones de años atrás, la cantidad total de corteza continental era minúscula. Las concentraciones relativas de isótopos de neodimio, estroncio y plomo encontradas en las cortezas continentales y oceánicas respaldan semejante conclusión. Hace unos 3800 millones de años, el manto terrestre comenzó a separarse en componentes más densos y más ligeros, liberando así el material del cual se formaron los bloques continentales. Al parecer, los continentes han seguido en rápida expansión hasta hace unos 2500 millones de años.

¿Cómo era la dinámica interna de la Tierra durante esa época de continentes en continuo crecimiento? Mi grupo de Toronto, en colaboración con Alfred Kröner, de la Universidad Gutenberg en Mainz, y Michael O. McWilliams, de la Universidad de Stanford, ha abordado esta cuestión, para lo cual estimamos la magnitud de la deriva continental primitiva. Los geofísicos pueden seguir los movimientos continentales recientes por medio del registro magnético que conserva el fondo oceánico. Estos fondos sobreviven sólo unos 200 millones de años, tras lo cual se hunden de nuevo en el manto terrestre por los márgenes oceánicos, tal como sucede a lo largo de la fosa del Pacífico frente a Asia.

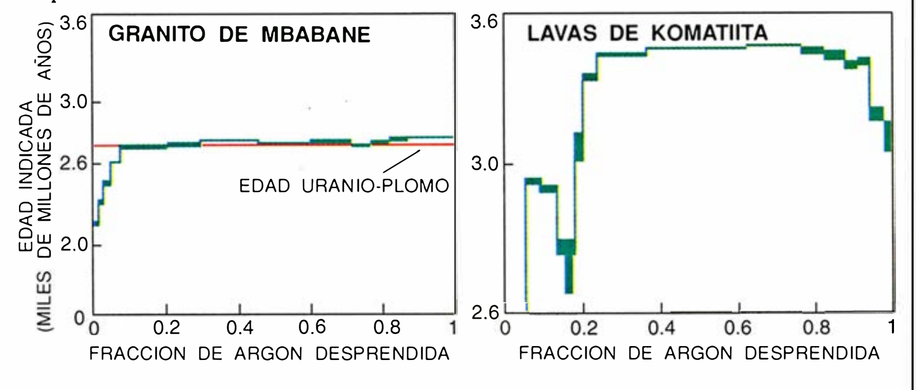
Determinar los movimientos de los continentes hace más de 2000 millones de años requiere ampliar los instrumentos de la geocronología para incluir las mediciones del magnetismo interno de una roca. Cuando se arrojan lavas por erupción o cuando los granitos se forman en las capas externas de la Tierra, los óxidos de hierro presentes en la roca quedan imantados en la dirección del campo magnético terrestre en aquel lugar: se comportan como diminutos imanes que se orientan hacia el polo Norte. La medida de la dirección del campo que ha quedado solidificada en la roca revela a qué distancia estaba del polo magnético al enfriarse. Estudiando el magnetismo de las rocas de distintas edades se puede, en principio, conocer cuánto se ha acercado el continente al polo o alejado del mismo a lo largo del tiempo.

Por desgracia, si una roca se calienta por encima de una temperatura crítica, pierde su dirección magnética original y vuelve a imantarse la próxima vez que se enfría, con una nueva dirección que puede ser totalmente distinta de la original si el continente ha derivado de manera apreciable en latitud durante los años transcurridos. Sin embargo, si el calentamiento de la roca no ha sido tan intenso, parte de la orientación del magnetismo original subsiste. En ese caso, los geofísicos pueden extraer de la roca un registro de dos antiguas posiciones del polo: una en la época de la cristalización o enfriamiento inicial y la otra en la del calentamiento metamórfico. Dado que todas las rocas precámbricas conocidas han sufrido algún episodio de calentamiento, resulta esencial descifrar el registro magnético auténtico de una roca para desvelar su historia térmica.

Un valioso método de datación radiactiva denominado técnica del potasio-argón a veces permite a los investigadores tanto determinar la edad de las rocas magnetizadas como apreciar si han sufrido recalentamiento durante su vida y en qué medida. El potasio-40, un isótopo raro cuyo período radiactivo es de 1300 millones de años, se desintegra produciendo argón-40, versión pesada del gas noble argón. Partiendo de la acumulación de argón-40 en los minerales que contienen potasio, se puede establecer cuánto tiempo hace que el mineral se solidificó.

La datación mediante el potasio-argón ha ayudado a los especialistas en geocronología a perfilar la escala temporal de la evolución biológica durante los últimos 500 millones de años. Pero ha demostrado ser menos adecuada para explorar la historia más remota de la Tierra, puesto que el argón tiende a escapar de los minerales durante las épocas de calen-

partir de la relación de argón 40 a argón 39. Las edades pequeñas obtenidas a bajas temperaturas indican que se perdió parte del argón durante la historia de la muestra; la meseta de edades, a temperaturas superiores, debe reflejar la verdadera edad de la muestra. A la derecha, el calentamiento escalonado por láser de cuatro granos de hornblenda tomados del granito de Mbabane en Swazilandia revela que tienen 2700 millones de años, en muy buen acuerdo con la edad deducida de las medidas de uranio-plomo. Analizando las lavas de komatiitas de la misma región se descubre que su primer enfriamiento ocurrió hace 3500 millones de años.



tamiento metamórfico. Para revelar las edades de cristalización de las rocas más antiguas es más eficaz el método del uranio-plomo, junto con un procedimiento algo menos usual que se basa en isótopos del rubidio y estroncio.

La facilidad con que puede perturbarse el reloj de potasio-argón ofrece en compensación la ventaja de permitir desentrañar la historia térmica de una roca, información que a su vez da sentido a la historia magnética de esa roca. Los geocronólogos han estudiado muchas clases diferentes de minerales para determinar la facilidad con que desprenden el argón ocluido al ser calentados. La hornblenda, mineral muy corriente, ha mostrado ser muy resistente a la pérdida de argón: habitualmente, hace falta calentarla mucho (por encima de unos 500 grados Celsius) para que deje escapar parte del argón. Los minerales moscovita y biotita, dos formas de la mica, son algo menos resistentes al calor: pueden ser alterados por temperaturas comprendidas entre 250 y 350 grados. En el otro extremo, el mineral feldespato da señales de pérdida de argón por debajo de los 200 grados.

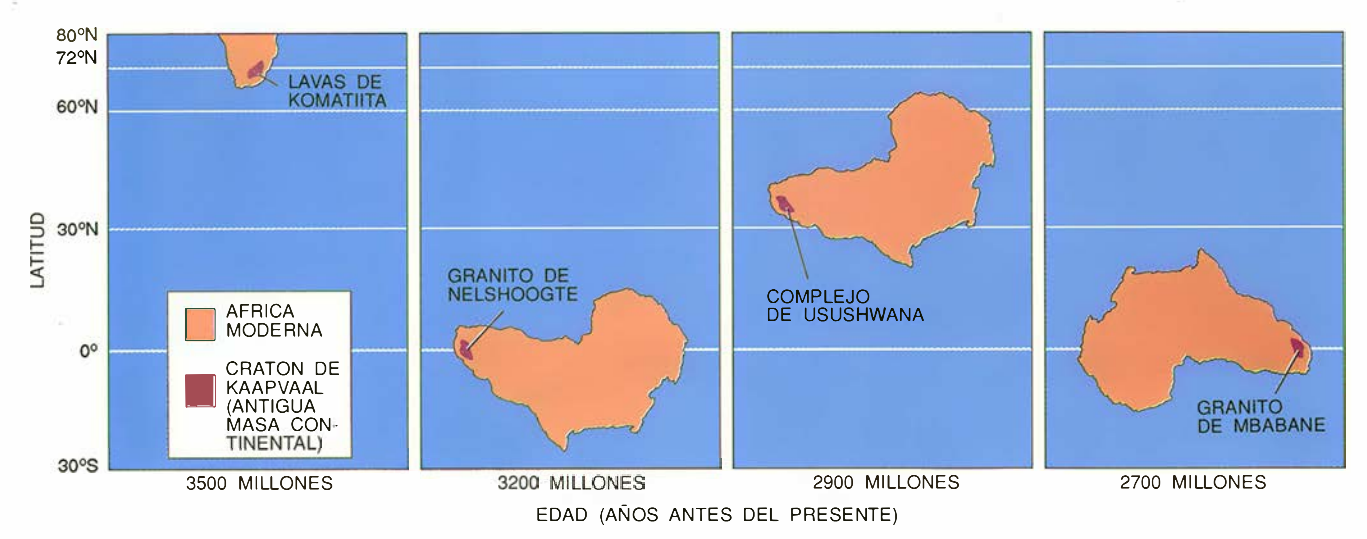
Los investigadores que buscan indicaciones de deriva continental durante la primera mitad de la historia de la Tierra han concentrado gran parte de su atención en una serie de rocas notablemente bien conservadas en el cinturón de rocas verdes antiguas de la Tierra de la Montaña de Barberton, en la frontera entre Sudáfrica y Swazilandia. Las rocas forman parte del cratón de Kaapvaal, una sección de la corteza continental estable y antiquísima. El referido cinturón de rocas verdes contiene numerosas rocas volcánicas enterradas bajo sedimentos posteriores. Otras rocas graníticas, más jóvenes, han forzado su afloramiento a través de las capas de rocas verdes más antiguas.

Mis colaboradores y yo hemos buscado indicios de deriva tectónica ocurrida hace más de 2000 millones de años, realizando detallados análisis magnéticos y llevando a cabo la datación, por las técnicas de potasio-argón y uranio-plomo, de circones obtenidos de dos muestras de granito del cratón de Kaapvaal. En Mainz, Kröner aplicó el método del uranio-plomo a cristales de circón procedentes de lavas del cratón, y demostró que habían cristalizado hace unos 3500 millones de años, lo que concordaba bastante con anteriores mediciones tomadas en la Universidad de Cambridge. También descubrió que los granitos de la región de Nelshootge del cratón de Kaapvaal cristalizaron hace 3200 millones de años; los granitos de la vecina región de Mbabane se solidificaron por primera vez hace 2690 millones de años.

Paul W. Layer, Margarita López-Martínez y yo emprendimos en mi laboratorio de la Universidad de Toronto dataciones por el método del potasio-argón con el fin de examinar la historia térmica de las rocas como primer paso para interpretar su archivo magnético. Para ello utilizamos una ingeniosa variante del referido método, denominada datación argón-argón, que originariamente había propuesto Craig M. Merrihue, de la Universidad de California en Berkeley. En el enfoque de Merrihue, se irradia una muestra de roca con neutrones procedentes de un reactor nuclear, transmutando parte del potasio en argón 39. La muestra se funde luego en una cámara de vacío, desprendiendo argón 39 y argón 40. En lugar de medir por separado las concentraciones de potasio y de argón en la muestra, sólo se requiere una observación de los dos isótopos de argón para deducir la edad de esa muestra.

Merrihue comprendió que su técnica podía proporcionar información vital sobre la historia térmica de la roca en estudio. Sugirió que, en vez de fundir todo el mineral irradiado de golpe, se calentase escalonadamente la muestra y se midiera la relación de argón 40 a argón 39 —deduciendo de ella la edad correspondiente— para cada temperatura. Si en cada medición se obtuviera la misma edad, sería razonable suponer que la muestra hubiese sufrido escasa perturbación térmica durante su historia. El hecho de que las edades medidas empezaran siendo bajas para temperaturas no muy elevadas y luego ascendieran hasta una meseta de mayores edades para temperaturas más altas, significaría que parte del argón 40 se habría desprendido del mineral durante uno o varios episodios de calentamiento. La edad de la meseta tiene en cuenta todo el argón 40 que se ha desprendido bajo un fuerte calentamiento, y debe por tanto dar una buena indicación del tiempo en el que por primera vez se solidificó la roca y se puso en marcha el reloj de potasio-argón.

En Toronto, mis colaboradores y yo aplicamos el método de calentamiento escalonado a los granitos de Nelshootge y Mbabane, así como a lavas relacionadas con la roca volcánica cuya edad había medido Kröner por el método del circón. Hicimos uso de otra innovación: una técnica de calentamiento por láser que desarrollé en colaboración con Chris M. Hall y Yotaro Yanase. George H. Megrue, de la Institución Smithsoniana, había iniciado una técnica similar en los años setenta, demostrando que era posible medir por argón-argón la edad de un mineral, vaporizando parte de la muestra con un láser pul-



3. LA ANTIGUA DERIVA CONTINENTAL queda registrada por los campos magnéticos congelados en cuatro clases de rocas del cratón de Kaapvaal, región de la corteza continental estable y extremadamente antigua (el continente africano, mostrado como referencia, no existía en su forma moderna). Las rocas imanadas operan a modo de brújulas y revelan la orientación del cratón y la latitud en el momento de cristalizar las rocas. El cratón de Kaapvaal derivó a una velocidad bastante similar al ritmo actual de la tectónica de placas. (Los esquemas de este artículo han sido realizados por Ian Worpole.)

sante. Su método no tuvo amplia aceptación entonces, dada la incapacidad de modular la potencia del láser para calentar la muestra escalonadamente, en incrementos bien definidos.

Modificando la técnica de Megrue, nuestro grupo logró utilizar un láser de haz continuo para obtener un espectro de edades preciso partiendo de un solo grano de roca. Comenzamos exponiendo un trocito de mineral a un haz láser de baja potencia durante 30 segundos; analizamos el argón desprendido mediante un espectrómetro de masas. Aumentamos después la potencia del haz láser en sucesivos incrementos, y en cada uno de ellos dedujimos la edad correspondiente. Cuando el mineral se funde, se ha alcanzado la temperatura de cristalización, y el espectro de edades queda completo.

La combinación del calentamiento por láser y el análisis de argón-argón está proporcionando una información de finísima exactitud acerca de la edad y los antecedentes térmicos de las rocas antiguas. Esa información nos ha permitido reconstruir una historia sin precedentes de la deriva continental, tal como ocurrió hace miles de millones de años. Empezamos examinando la historia del granito de Mbabane. Layer y McWilliams habían descubierto que esta roca contiene una imagen magnética del polo, indicativa de que la roca se solidificó en algún lugar próximo al ecuador terrestre. Un análisis ulterior demostró que el granito de Mbabane adquirió su orientación magnética cuando la roca se enfrió desde unos 600 a unos 500 grados Celsius.

La datación por láser mediante el método del argón-argón de cuatro cristales de hornblenda en roca de granito, que realizó mi grupo de Toronto, produjo un espectro de edades que presentaba un ancha meseta en 2690 millones de años, esencialmente idéntica a la edad deducida por Kröner mediante el uranio-plomo para los circones de alrededor. La estrecha concordancia entre las dos técnicas de datación implica que las hornblendas, y con ellas la totalidad del granito, nunca habían sido calentadas a temperaturas superiores a 500 grados tras haberse enfriado por primera vez. Llegamos a la conclusión de que la posición del polo magnético detectada en el granito quedó registrada cuando las rocas se enfriaron y se solidificaron inicialmente hace 2690 millones de años, época en la que el granito de Mbabane estaba en el ecuador.

Layer y sus colegas habían logrado ya deducir que otro grupo de rocas ígneas, hoy situado a 12 kilómetros del granito de Mbabane, distaba algo más de 30 grados del ecuador hace 2875 millones de años. Si esas dos formaciones han mantenido siempre su proximidad, el área del cratón de Kaapvaal debe haber derivado unos 30 grados de latitud entre los 2875 y 2690 millones de años pasados. Tal movimiento implica una velocidad de deriva aproximada de 1,5 centímetros por año, comparable a la velocidad con la que Norteamérica se ha ido alejando de la dorsal atlántica central durante los últimos 100 millones de años. Cabe preguntarse si la tectónica de placas se producía al mismo ritmo en épocas todavía más remotas.

Kröner había demostrado que el granito de Nelshootge tiene 3210 millones de años de antigüedad. El análisis por láser de cristales de hornblenda en el granito sugirió que la roca adquirió su imanación en una época temprana de su historia, al menos hace 3180 millones de años. Al examinar la orientación del campo magnético del granito, hallamos que también éste parecía haberse formado a 90 grados de distancia angular del polo, es decir, en el ecuador. Sin embargo, la dirección del polo Norte registrada en el granito de Nelshootge se aparta en muchos grados de la posición congelada en el granito de Mbabane, por lo que el cratón de Kaapvaal debe haber girado notablemente durante los años que median entre ambos instantes.

Por último, pasamos a examinar la roca de Barberton más antigua de nuestra colección, unos fragmentos de lavas ricas en magnesio denominadas komatiitas. En las rocas volcánicas relacionadas con esas lavas se encuentran circones que datan de casi 3500 millones de años atrás. David J. Dunlop y Chris J. Hale, de la Universidad de Toronto, consiguieron recuperar un débil campo magnético congelado en las komatiitas, el cual indicaba que las rocas estaban sólo a 18 grados del polo en su primer enfriamiento, y de ningún modo próximas al ecuador. Este descubrimiento, sin embargo, no tenía una interpretación clara. Evidentemente, las lavas han estado someti-

das a calentamiento y presión muy intensos a raíz de su formación; por consiguiente conservan pocos, si alguno, de sus minerales originales, con lo que la imanación observada por Dunlop y Hale podía ser mucho más reciente que los mencionados 3500 millones de años.

Para dirimir la cuestión, López-Martínez, entonces estudiante graduada en mi laboratorio, realizó mediciones mediante el argón-argón para determinar la edad de las muestras de komatiita. Con gran sorpresa suya —y mía— las edades que obtuvo no se diferenciaban de las halladas por Kröner al estudiar los circones en las lavas. Los circones datan la cristalización inicial de las lavas, mientras que el análisis por argón-argón mide la edad de la tremolita, mineral formado durante el metamorfismo. La única manera de dar sentido a los resultados de López-Martínez es que el episodio metamórfico que creó la tremolita tuviera lugar casi inmediatamente después de la primera erupción de lava. Si es así, la posición del polo en las komatiitas de Barberton constituye un registro genuino de la posición de la roca hace unos 3500 millones de años.

Ensamblando todas las indicaciones anteriores se consigue una historia de la deriva del cratón de Kaapvaal, que abarca 800 millones de años y se inicia hace 3500 millones de años. En aquella época, el cratón estaba cerca del polo. Alrededor de 3180 millones de años atrás, se había corrido hacia el ecuador. Después, el cratón se desplazó más de 3000 kilómetros hacia el polo, de manera que hace 2875 millones de años se encontraba al menos a 30 grados del ecuador. Unos 2690 millones de años atrás, el cratón había vuelto a derivar hacia el ecuador, pero su orientación era sensiblemente diferente de la que había tenido 490 millones de años antes.

De nuestro trabajo se infiere que el cratón de Kaapvaal ya derivaba 3500 millones de años atrás a una velocidad pareja a la que lo hacen los modernos continentes. Cabe suponer que otros fragmentos continentales se comportaban de la misma manera. Debe hacerse hincapié en que, pese a los muchos avances en metodología e instrumentación, los estudios de trazas magnéticas dejan todavía amplio margen al error. No obstante, los métodos de datación del uranio-plomo y del argón-argón, combinados con los estudios paleomagnéticos, han contribuido notablemente a mejorar nuestro conocimiento de la primitiva historia dinámica de la Tierra.

El éxito de nuestra investigación de las komatiitas del Barberton nos hizo preguntarnos si las más antiguas rocas conocidas, los gneiss de Acasta, no incorporarían una instantánea de su posición respecto al polo magnético hace 3960 millones de años. Lamentablemente, no parece así. En mi laboratorio, Hall realizó dataciones provisionales por argón-argón de cristales de hornblenda procedentes de una de las muestras de Bowring. Sus resultados muestran que los relojes de argón-argón de las rocas se volvieron a poner en hora por un brote de actividad tectónica hace 1800 millones de años. Cualesquiera trazas magnéticas que existieran hace 3960 millones de años habrían sido borradas por completo.

Pese a ello, subsiste la esperanza. Tal vez las ulteriores mediciones de rocas procedentes de la misma región del Norte del Canadá puedan al fin proporcionar un pequeño fragmento que haya escapado al intenso recalentamiento ocurrido durante los episodios de formación de montañas. El registro magnético encontrado en una roca tal tendría un valor incalculable para descifrar la evolución de la Tierra. La prueba de que la Tierra poseía un campo magnético apreciable en fecha tan temprana sería una señal evidente de que había desarrollado ya un núcleo metálico importante, paso clave en la transformación de un planeta infantil en un mundo complicado y bien ordenado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COOLING HISTORIES FROM ^{40}AR/^{39}AR AGE SPECTRA: IMPLICATIONS FOR PRECAMBRIAN PLATE TECTONICS. D. York en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 12, págs. 383-409, 1984.

THE DERIVATION OF ^{40}AR/^{39}AR AGE SPECTRA OF SINGLE GRAINS OF HORNBLENDE AND BIOTITE BY LASER STEP-HEATING. P. W. Layer, M. C. Hall y D. York en *Geophysical Research Letters*, vol. 14, n.º 7, págs. 757-760, julio de 1987.

ELEMENTS OF THE ARCHEAN THERMAL HISTORY AND APPARENT POLAR WANDER OF THE EASTERN KAAPVAAL CRATON, SWAZILAND, FROM SINGLE GRAIN DATING AND PALEOMAGNETISM. P. W. Layer, A. Kröner, M. McWilliams y D. York en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 39, n.º 1, págs. 23-24, mayo de 1989.

CRUST FORMATION AND PLATE MOTION IN THE EARLY ARCHEAN. A. Kröner y P. W. Layer en *Science*, vol. 256, págs. 1405-1411, junio de 1992.

Lémures de Madagascar

Estos primates encierran la clave de aspectos importantes de nuestro pasado evolutivo. Pero muchas especies se han extinguido y están menguando, a un ritmo preocupante, los hábitats de las que quedan

Ian Tattersall

De las densas pluviselvas a las llanuras costeras abiertas, de los matorrales deciduos al desierto, Madagascar ofrece un tapiz variopinto de paisajes. Estos hábitats albergan una fauna primatológica extraordinaria que muestra, con singular claridad, cómo eran nuestros antepasados primates en el despertar de la edad de los Mamíferos, hace unos 50 millones de años.

Hablamos de los lémures, los mamíferos dominantes de Madagascar. No se sabe bien la razón de su presencia allí. Hubo un tiempo en que se admitía que la isla malgache, de 1600 kilómetros de longitud, se había limitado a conservar (de forma bastante pobre) una fauna arcaica que quedó aislada cuando Madagascar se separó del continente y derivó mar adentro. En muchos aspectos, los primates "inferiores" que viven en ese minicontinente se parecen más a los primates del Eoceno (época que transcurrió entre 57 y 35 millones de años atrás) que a los primates "superiores" actuales de nuestros continentes tropicales. Por esta razón se suponía que la separación había tenido lugar en el Eoceno o en sus inmediaciones.

Pero sabemos ya que Madagascar inició su viaje de separación de Africa hace 165 millones de años, por lo menos, cuando los dinosaurios dominaban y los mamíferos, parecidos vagamente a las musarañas, eran de talla minúscula. Se cree, además, que la isla alcanzó su distancia actual del continente, unos 400 kilómetros, decenas de millones de años antes de la gran diversificación de los mamíferos y, por tanto, mucho antes de que aparecieran primates, quirópteros y roedores.

Así pues, el único medio posible de acceso a la isla para primates terrestres y similares neoinvasores era a través de almadías, cruzando el canal de Mozambique sobre balsas de vegetación enmarañada. A su arribada, los lémures ancestrales habrían encontrado una increíble profusión de oportunidades ecológicas en una isla topográfica, climática y ecológicamente muy rica.

Madagascar evoca la imagen de la pisada del pie izquierdo, con su eje longitudinal orientado más o menos en sentido norte-sur. Se extiende desde los 12 grados del ecuador hasta la zona subtropical meridional. Su región oriental presenta un pronunciado escarpe a los vientos dominantes del este; las lluvias copiosas, repartidas por todo el año, favorecen el desarrollo de una pluviselva densa. Hacia el oeste, una meseta central abrupta desciende suavemente hacia llanuras costeras, muy anchas, que se hacen más secas hacia el sur. La selva húmeda del noroeste deja paso a bosques deciduos y matorrales. Estos, a su vez, transitan, en el extremo meridional, hacia una flora extraordinaria, adaptada a condiciones desérticas y en la que el 98 por ciento de las especies son exclusivas. Añádase a estas regiones principales un número altísimo de microclimas locales, y se tendrá un surtido único de ambientes a disposición de los mamíferos silvícolas.

Nadie sabe qué hábitats ofrecía Madagascar en la época remota en que llegaron los primates, o qué animales vivían en esos ambientes: no hay registro fósil. Sí está comprobado que los primates medraron; lo está también que, cuando el hombre puso pie en la isla, no hará ni 2000 años, Magadascar albergaba al menos 45 especies de lémures, cuyo tamaño iba desde el lémur ratón, *Microcebus*, de unos 60 gramos de peso, hasta *Archaeoindris*, que con sus 180 kilogramos podía ser digno rival de un gorila corpulento.

Los lémures son primates inferiores, pertenecientes (con los galagos, los potos y los loris) al suborden Estrepsirrinos. Nosotros, en cambio, somos primates superiores, y pertenecemos (con los monos y antropomorfos) al suborden Antropoideos. (No hay consenso sobre el grupo donde incluir el diminuto y enigmático tarsero del Sudeste asiático.) La distinción entre primates inferiores y superiores es, en realidad, un concepto arcaico, que se está abandonando y que, por mor de conveniencia, recuperamos aquí.

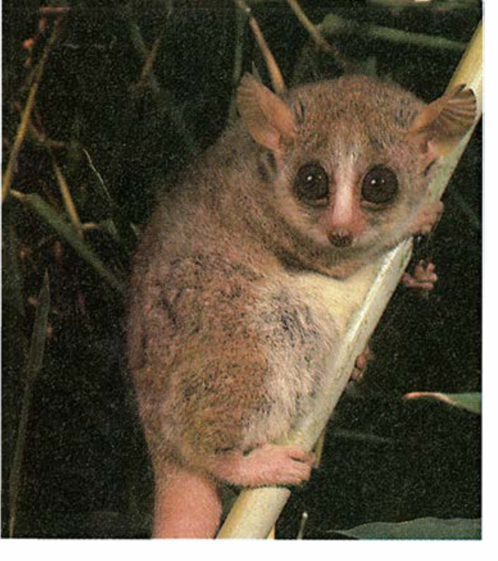
Los primates superiores aparecieron en la escena evolutiva mucho

IAN TATTERSALL es paleontólogo experto en primates, que ha trabajado en el estudio de los lémures actuales y subfósiles de Madagascar. Situado al frente del departamento de antropología del Museo Americano de Historia Natural, le interesa sobre todo la integración de teoría evolutiva y registro fósil.

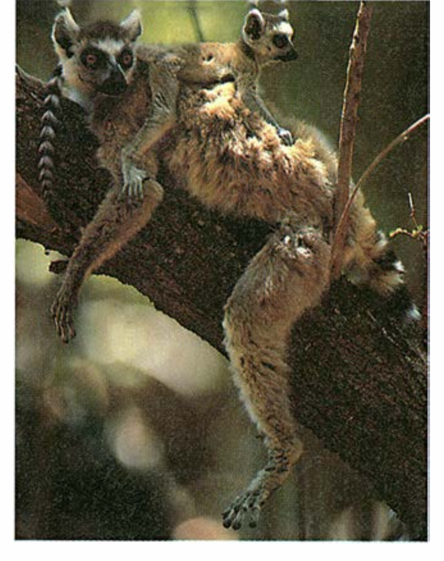


1. SIFACAS DE COQUEREL, una variedad de lémur, en un bosque del noroeste de Madagascar. Estos primates inferiores evolucionaron a partir de lémures ancestrales que pudieron haber atravesado en almadías de vegetación el canal de Mozambique, mucho después de que Madagascar se separara de Africa. Esta isla, con unos 1600 kilómetros de longitud, se encuentra a 400 del continente.





LEMUR RATON RUFO *Microcebus rufus*

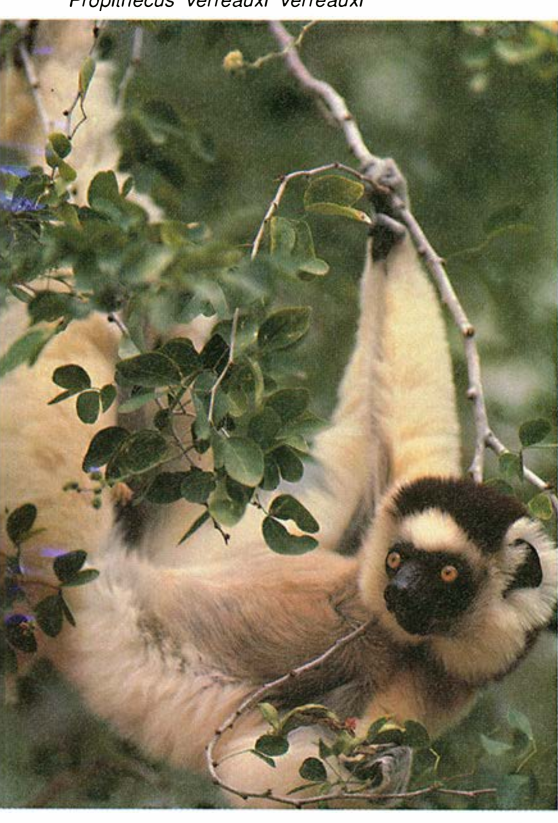


LEMURES DE COLA ANILLADA *Lemur catta*



LEMUR DEL BAMBU DORADO *Hapalemur aureus*

SIFACA DE VERREAUX *Propithecus verreauxi verreauxi*



después que los inferiores, a partir de uno de los cuales emergieron en las postrimerías del Eoceno. Los lémures de Madagascar y sus primos continentales tienen bastante en común con las formas del Eoceno, pues conservan rasgos físicos que se han perdido en los primates superiores. Pero sólo en Madagascar hallamos todavía primates inferiores que son diurnos, o activos durante el día. La inmensa mayoría de los actuales primates superiores poseen hábitos diurnos, y, si hay algo seguro en paleontología, ello es que todos los antropoides descienden de un antepasado común diurno. Por consiguiente, si buscamos analogías con nuestros antepasados remotos del Eoceno, hemos de acudir a los primates de Madagascar.

Los primates modernos inferiores se distinguen de los superiores en varios caracteres estructurales; los más significativos atañen al sistema nervioso y a los órganos de los sentidos. Los inferiores presentan un cerebro mucho menor que los superiores en proporción al tamaño corporal. Difieren también en el desarrollo de las áreas de asociación, que gobiernan la transferencia de información entre los centros cerebrales.

Divergen, asimismo, en el equilibrio entre el sentido de la vista y el del olfato. Aunque los ojos de los primates inferiores ocupan una posición bastante frontal, los campos visuales izquierdo y derecho no se superponen tanto como en los primates superiores. Esta disposición limita la percepción de la profundidad en la parte central del campo de visión. Y si parece natural que los primates inferiores nocturnos carezcan de conos retinianos (células sensibles al color), lo poco que se sabe de la capacidad discriminadora de los ojos de los lémures diurnos induce a sospechar que su visión de los colores es, en el mejor de los casos, limitada.

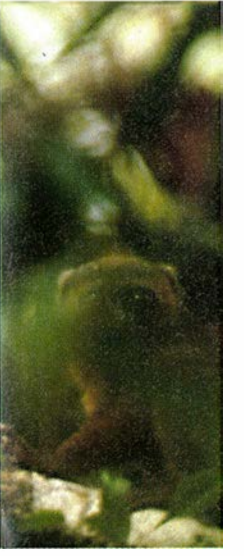
En cuanto al sentido del olfato, los primates inferiores tienen cavidades nasales más espaciosas que los superiores, con estructuras internas más complejas. Los primates inferiores actuales han retenido un rasgo primitivo, el rinario, o "nariz húmeda", de los mamíferos. Forma parte

SIFACA DE CORONA DORADA *Propithecus tattersalli*



LEMURES DE COLLAR ROJO *Varecia variegata rubra*







SIFACA DE VERREAUX, VARIANTE PRINCIPAL DE FORSYTH *Propithecus verreauxi verreauxi*



LEMUR CORONADO, HEMBRA* *Eulemur coronatus*
*Se indica el sexo si el colorido del macho y de la hembra difieren

de un sistema para la transferencia de partículas hacia la cavidad nasal, donde son analizadas por un órgano que sólo es vestigial en la mayoría de los primates superiores.

Muchos primates inferiores (y algunos monos sudamericanos entre los primates superiores) poseen glándulas olorosas que exudan sustancias empleadas para "marcar" el territorio, lo que reviste su interés en la comunicación entre individuos. Menos importancia adquieren las señales visuales, y así la cara de los primates inferiores carece de la musculatura necesaria para producir las complejas expresiones a través de las cuales los primates superiores transmiten su estado de ánimo.

En general, los primates actuales han perdido las garras primitivas que permitían a los preeocénicos, carentes de capacidad de asirse, trepar por los árboles. Aquéllos disponen de un pulgar, desplazado con respecto a los demás dedos y oponible hasta cierto punto, amén de almohadillas táctiles sensibles en las puntas de los dedos, que se apoyan en uñas planas. Este cambio fundamental trae consigo consecuencias que trascienden la mera locomoción y afectan a las capacidades de manipulación. Pero mientras que los primates superiores manipulan los objetos utilizando el pulgar en oposición a los demás dedos, los lémures tienden a tomar las cosas con la mano entera. El objeto asido de esta forma tiene más probabilidades de ser olido que de ser inspeccionado con la vista o de que se le dé la vuelta con los dedos para un examen más acabado.

Se trata, pues, de dos grupos de primates muy dispares, cuyos miembros representan innumerables variaciones sobre los temas esbozados. Los primates inferiores son evidentemente más primitivos que los superiores con respecto a los sistemas corporales que se han mencionado; se parecen más al antepasado del que emergieron ambos grupos modernos. Aunque sólo hay fósiles de huesos y dientes, se infiere del registro que, en el Eoceno, el cerebro de los primates era incluso menor en relación al tamaño corporal que el cerebro de los lémures modernos, y que el sentido de la vista no había

LEMUR NEGRO, HEMBRA *Eulemur macaco macaco*



LEMUR NEGRO, MACHO *Eulemur macaco macaco*



LEMUR MANGOSTA, HEMBRA Y CRIA *Eulemur mongoz*



LEMUR OJIAZUL, HEMBRA Y CRIA *Eulemur macaco flavifrons*

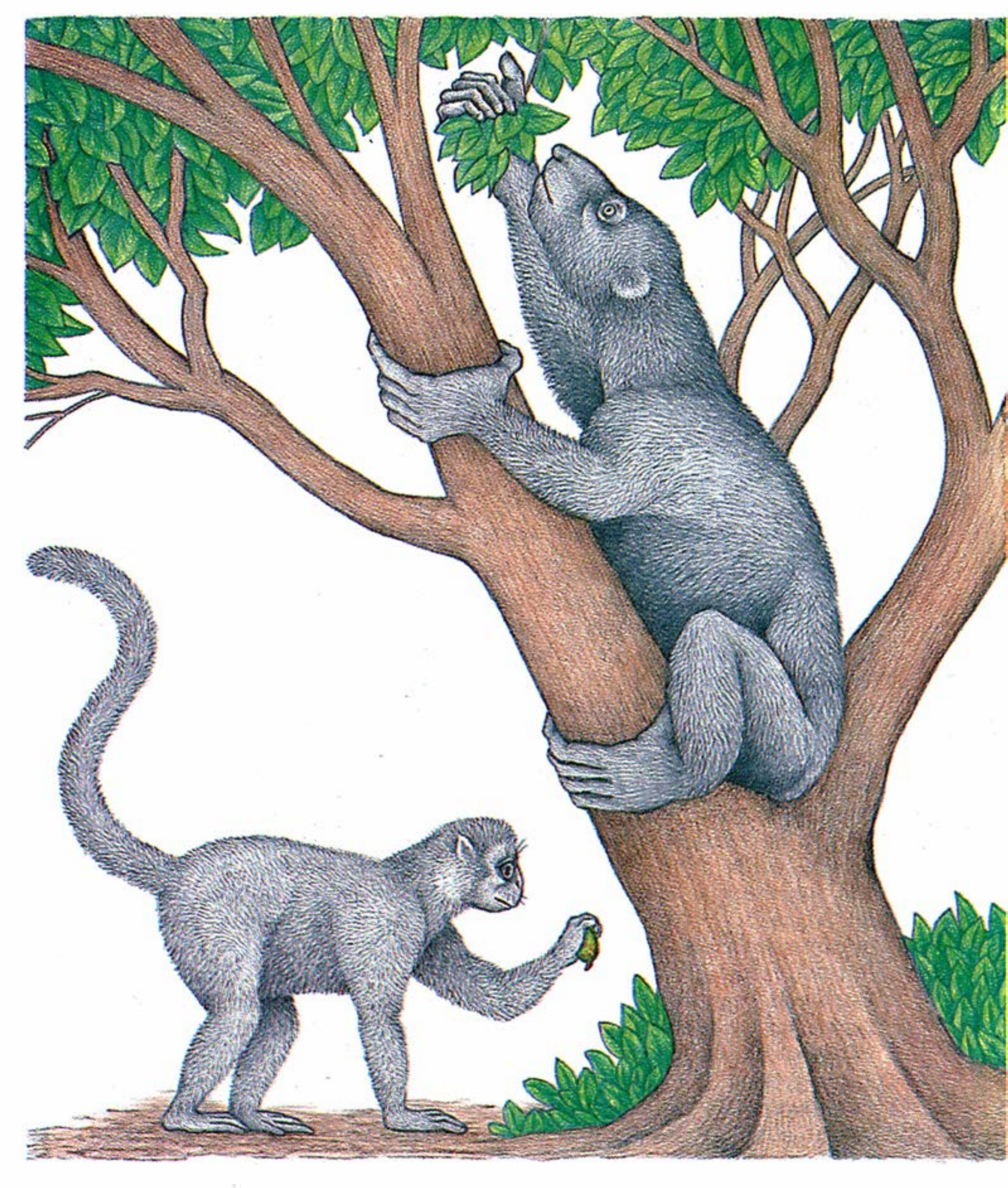


conseguido su dominio total sobre la olfacción, a diferencia de lo que podemos observar en los actuales primates superiores. Las manos y los pies de los primates del Eoceno estaban capacitados para agarrar, pero probablemente no podían manipular los objetos con precisión mayor que la evidenciada por los lémures supervivientes. En otras palabras: los primates del Eoceno no diferirían a buen seguro, en el desempeño de sus funciones orgánicas, de los lémures actuales. Y hasta tal punto debían de ser afines que, del estudio de la vida de los lémures, podemos extraer cuál era el potencial eocénico que posibilitó, andando el tiempo, el alumbramiento de las capacidades humanas.

Hasta los años sesenta no hubo trabajo de campo dedicado al estudio del comportamiento de los lémures malgaches. Los resultados obtenidos se han ido distanciando cada vez más de las hipótesis preestablecidas. Así, mientras fue posible pensar en "el lémur" como un modelo general ancestral, la expectativa, si alguna había, era sencilla: los lémures revelarían pautas de comportamiento relativamente estereotipadas, similares a las que exhibieron los primates primigenios y de las que los primates superiores habían conseguido emanciparse. Pero no ocurrió tal; los estudios de campo pusieron de manifiesto conductas muy dispares en la vida de los lémures.

Cierto es que se confirmaron algunas de las predicciones fundadas en consideraciones anatómicas. Quedó demostrado que las marcas olfativas, hechas de orina, heces y secreciones de glándulas especializadas, constituyen un componente significativo del comportamiento de los lémures. A juzgar por su generalización entre los mamíferos, estas marcas remontan su origen muy atrás y muy pocos cuestionarán su importancia en la comunicación entre los primates del Eoceno.

Como se presumía, los lémures tienden a explorar su entorno sirviéndose de la nariz; a modo de ejemplo, escogen la fruta madura por su olor y no por su aspecto. Resulta, pues, indudable que la olfacción desempeña un papel de primer orden en las cinco familias actuales de lémures, igual que lo cumplía para sus precursores del Eoceno, muy por encima del interés que encierra para la mayoría de los primates superiores. ¿Podemos invertir ese razonamiento para el caso de la visión? Cualquiera que haya observado a un lémur sifaca brincando por el bosque llegará a la conclusión de que no se resiente en absoluto de la falta del sistema visual que caracteriza a los primates superiores.

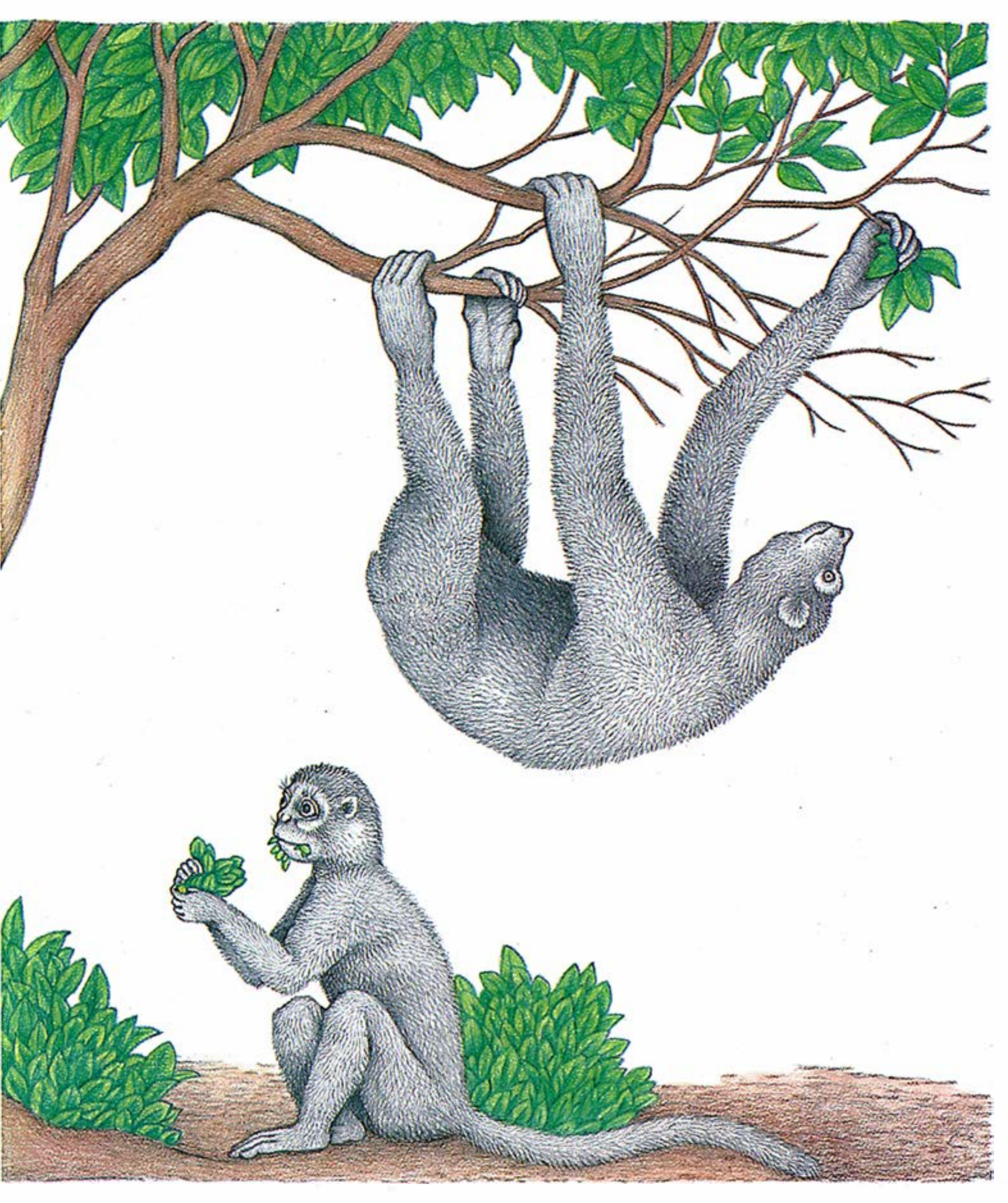


2. LEMURES EXTINGUIDOS: ***Archaeolemur (dos de los cuales se ilustran sobre el suelo), Megaladapis (arriba a la izquierda)*** **y** ***Palaeopropithecus (arriba a la derecha). Archaeolemur*** **tenía el tamaño aproximado de un papión y estaba adaptado a vivir sobre el suelo. En cambio,** ***Megaladapis*****, que podía pesar hasta 77 kilogramos, era arborícola y recordaba, en su comportamiento adaptativo, al koala australiano.**

Los lémures desarrollan pautas de conducta tan dispares cuan diversas nos las puedan ofrecer los primates superiores, si no más. Dígase lo mismo de la ecología. Su dieta viene a coincidir con los alimentos preferidos por éstos: frutos, flores, hojas, yemas e insectos. Se nutren también de néctar, algo insólito en los primates superiores. Aunque tienden a una alimentación generalista, algunos lémures se hallan muy especializados; por citar un ejemplo, los lémures del bambú, que se concentran en esa planta, e incluso en determinados órganos de la misma. Los individuos de la especie *Hapalemur aureus*, que no pesan más allá de 60 gramos, comen diariamente brotes que contienen cianuro suficiente para matar a media docena de hombres.

Los lémures ocupan los hábitats vegetacionales que vemos explotan los primates superiores, de la pluviselva al matorral árido. De nuevo, mientras que casi todos los primates superiores son diurnos, hay lémures nocturnos, otros diurnos y unos terceros "catemerales"; estos últimos reparten su actividad entre el día y la noche.

Amplia es, asimismo, la gama de tipos de organización social. Algunos llevan una vida más o menos solitaria, en la que el dominio restringido de la hembra se incluye en otro más extenso del macho. En algunas espe-



***Palaeopropithecus*, de unos 60 kilos, era arborícola y parecido al perezoso. Estas reconstrucciones (que se han hecho con la colaboración de Laurie R. Godfrey, de la Universidad de Massachusetts en Amherst) se basan en fósiles desenterrados desde finales del siglo XIX. Las excavaciones han proporcionado esqueletos, en su mayoría incompletos, de al menos ocho géneros y 15 especies de lémures extinguidos.**

cies, las parejas de adultos crían a sus hijos inmaduros; en otras se constituyen grupúsculos con adultos de cada sexo; y las hay que viven en grupos laxos o en unidades más estables que constan de un par de docenas de individuos o más.

Dentro de estas grandes categorías hallaremos también formas variantes. No deja incluso de sorprender que, en el interior mismo de una especie, encontremos una variación sustancial en la organización social de un lugar a otro. Ahondando más, debe destacarse que, si bien el cerebro de los lémures tiende a ser menor que el de los primates superiores, algunos desarrollan una socialidad compleja, propia de primate superior.

De ese cuadro que comienza a perfilarse, relativo al despliegue conductual de los lémures, podemos extraer valiosas pistas para conocer a nuestros antepasados del Eoceno. No obstante la persistencia de rasgos primitivos, como el de las marcas olfativas, el abanico de pautas de comportamiento mostradas nos sugiere que, desde un comienzo y mucho antes del aumento de volumen cerebral que asociamos con los antropomorfos actuales, los primates mostraron ya una flexibilidad y adaptabilidad extraordinarias; nadie habría imaginado tales cualidades en formas tempranas y consideradas "primitivas". Ahí reside, en mi opinión, el legado evolutivo que hemos heredado en nuestro orden, mucho más importante que cualquier carácter anatómico al uso. Instalados en nuestra atalaya, miramos a los lémures y preguntamos por qué no evolucionaron más hacia nuestra dirección. Pero al obrar así nos estamos olvidando del punto fundamental: en su conjunto, los lémures han heredado de sus antepasados del Eoceno, al igual que nosotros de los nuestros, la característica arquetípica de los primates.

Si se observa el cuadro desde otra perspectiva, resulta evidente que los lémures no necesitaron adquirir los rasgos físicos de los primates superiores para aprovecharse de las diversas posibilidades ecológicas que Madagascar les ofrecía. Para ponderar ese dato fijémonos en el número de especies que había en la isla a la llegada del hombre. Partimos de una variedad actual ya impresionante: desde el minúsculo lémur ratón, de 60 gramos de peso, hasta el babacoto (*Indri indri*), de 7 kilogramos. Pero antes la isla albergaba un muestrario de primates que igualaba, si no sobrepasaba, la variedad de todos los antropoides del mundo.

A finales del siglo XIX, las excavaciones realizadas en la meseta central sacaron a la luz restos subfósiles, o parcialmente fosilizados, de lémures extinguidos de gran tamaño; no eran muy antiguos. Sabemos de al menos 15 especies de lémures subfósiles, que pertenecían a ocho o más géneros distintos; todas superaban la talla de los lémures supervivientes. La misma pauta de tamaño corporal grande se encuentra en los demás miembros no primates de la fauna subfósil, entre los que se cuentan el ave elefante, *Aepyornis maximus* (la mayor ave que haya vivido nunca, que posiblemente pesaba casi media tonelada), el hipopótamo pigmeo y una tortuga gigante.

La investigación ha sacado a la luz un repertorio muy rico de comportamientos locomotores y posturales entre los lémures subfósiles. Los actuales desarrollan, por su parte, una gama amplia de tales comportamientos, que van de la locomoción cuadrúpeda rápida, a la carrera, del diminuto *Microcebus*, hasta el salto espectacular de los patilargos Indridos (sifacas, babacotos y afines). Ningún lémur actual está excluido de parte alguna del entorno forestal por sus especializaciones anatómicas locomotoras, si bien la mayoría de las especies evitan pasar mucho tiempo sobre el suelo. La única excepción notable es el lémur de cola anillada o maquí, *Lemur catta*.

Entre los extinguidos, en cambio, había un grupo adaptado a la vida en el suelo. Pertenecía a la familia Arqueolemúridos, que abarcaba dos géneros de tamaño medio: *Archaeolemur* y *Hadropithecus*. Laurie R. Godfrey, a quien debo las estimaciones de peso corporal subfósil que aquí se presentan, ha calculado que las especies de arqueolemúridos pesaban de 16 a 25 kilogramos.

Estos lémures eran parientes de los índridos, con patas más cortas, constitución robusta y dientes especializados. Clifford J. Jolly los ha comparado, respectivamente, con dos primates superiores africanos, el papión común y el gelada. El papión común es una forma versátil, que la hallamos lo mismo en la selva y bosques que en la sabana. El papión gelada se halla específicamente adaptado a las tierras altas desforestadas de Etiopía; su alimento procede del suelo. Por su dentición y por lo que se conoce de su esqueleto, *Hadropithecus* tenía idénticas inclinaciones alimentarias y de hábitat.

Otro pariente extinguido de los índridos presentaba un conjunto de adaptaciones diferente. Para buscarle afinidades hemos de mirar lejos de los primates. *Palaeopropithecus* comprendía al menos dos especies con un peso entre los 40 y los 60 kilogramos. Ross MacPhee ha analizado un esqueleto recuperado hace pocos años en el norte de Madagascar, y ha llegado a la conclusión de que se trataba de un animal arborícola que se colgaba de las ramas, de movimientos lentos y parecido a un perezoso, con una estructura corporal que aseguraba la flexibilidad más que la robustez. Su pariente *Archaeoindris*, todavía mayor (más de 180 kilogramos, quizá), es poco conocido, pero Martine Vuillaume-Randriamanantena sospecha que sería un cuadrúpedo terrestre algo parecido a los perezosos terrestres extinguidos del Nuevo Mundo. Estas dos formas presentaban especializaciones del cráneo, en particular del área nasal, que no tienen parangón entre los primates actuales.

Hemos de salir a extramuros de nuestro propio orden para descubrir una réplica del mejor conocido de los lémures subfósiles, *Megaladapis*. Las tres especies, cuyo peso iba de aproximadamente 40 a 77 kilogramos, han sido estudiadas por Alan C. Walker; recordaban, en su locomoción, al koala marsupial de Australia: igual que éste, tales lémures treparían con lentitud, preferirían los soportes verticales y tendrían una capacidad de salto limitada. Varias especializaciones del cráneo debieron compensar estas limitaciones locomotoras y permitir que el animal comiera de un amplio radio desde su singular posición sedente.

De cuantos yacimientos han aportado lémures extinguidos sobresale Ampasambazimba, en los altiplanos centrales de la isla. Las 14 especies de primates (entre lémures extinguidos y actuales) cuyos huesos se han recuperado allí salen favorecidas, por lo que se refiere a concentración, en el cotejo con especies de cualquier otro lugar del mundo donde haya primates. Pero Ampasambazimba está en una meseta hoy desarbolada. ¿Cómo puede disfrutar de una fauna forestal tan rica y heterogénea?

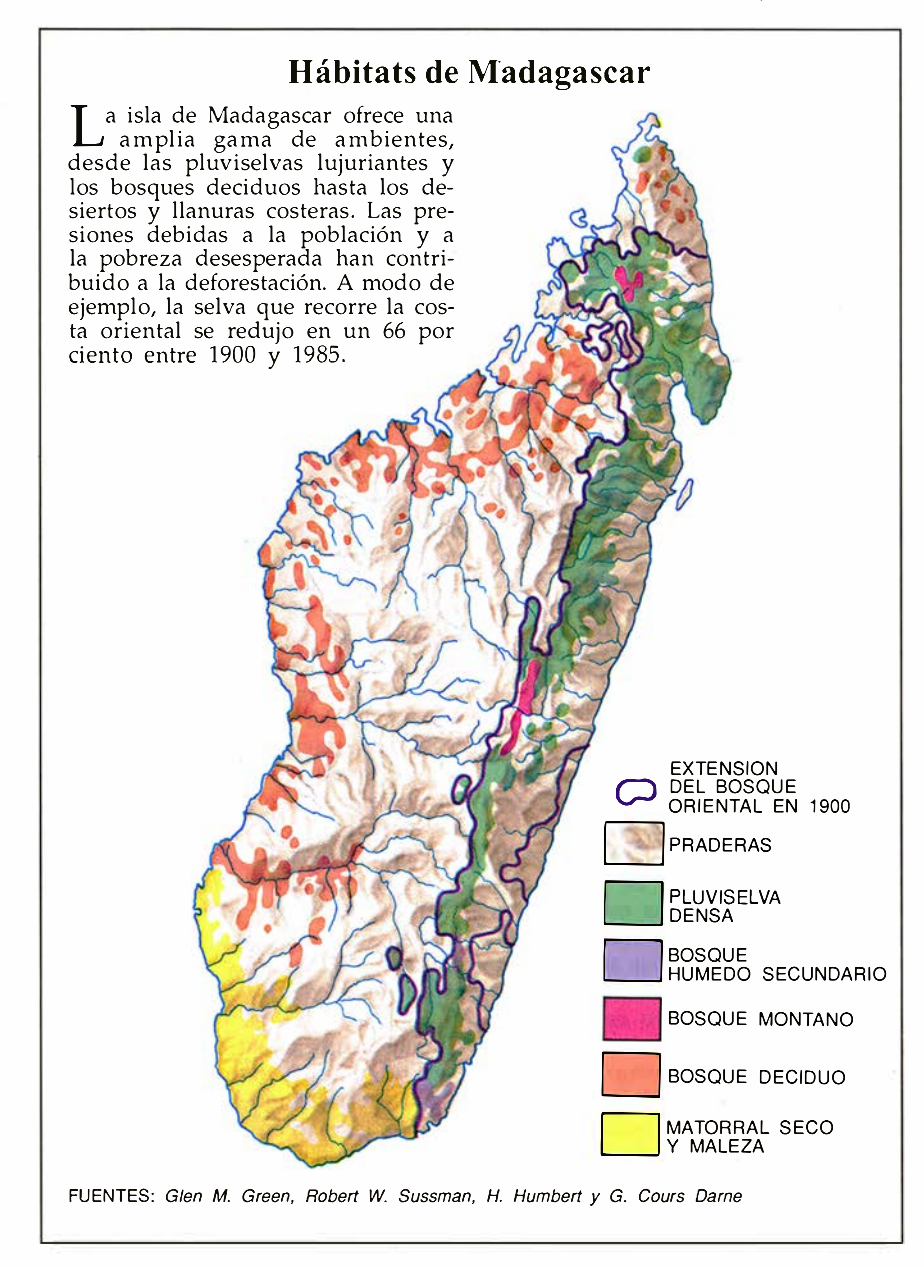
Los trabajos publicados a principios de siglo parecían haber dado con la respuesta. Antes de la llegada del hombre, Madagascar sería una isla cubierta de bosque, que quedó diezmado aquí y allá por la quema de grandes extensiones para convertirlas en pastos o tierras de labor. Se trata de un proceso que todavía podemos contemplar.

Siguiendo con esa línea de razonamiento, la pérdida de hábitats se dejó sentir en la desaparición de los grandes mamíferos y aves de Madagascar. La extinción presentaba un aspecto selectivo: los lémures extinguidos eran de gran tamaño, los más interesantes y fácil caza. Cabría presumirles también una tasa de reproducción menor que las formas más pequeñas que han sobrevivido. Que la causa de la extinción resida en una combinación de actividades humanas directas e indirectas parece un argumento sólido.

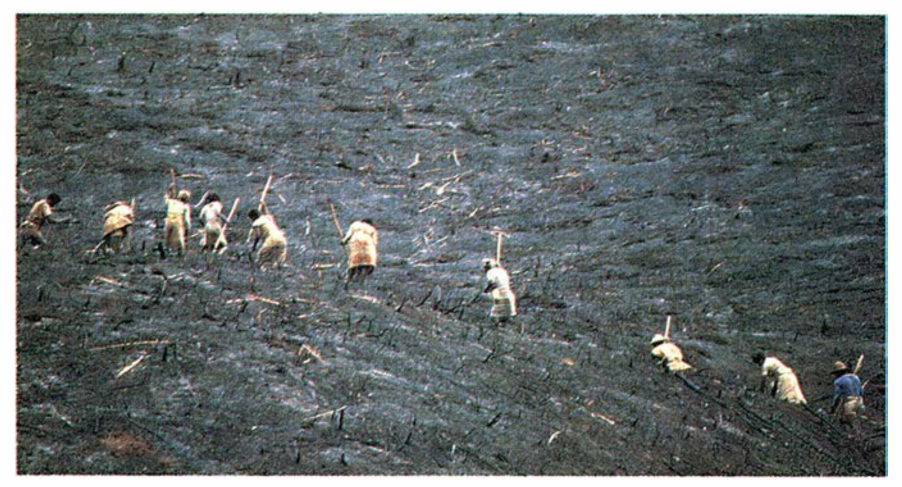
Se ha responsabilizado también al

Hábitats de Madagascar

La isla de Madagascar ofrece una amplia gama de ambientes, desde las pluviselvas lujuriantes y los bosques deciduos hasta los desiertos y llanuras costeras. Las presiones debidas a la población y a la pobreza desesperada han contribuido a la deforestación. A modo de ejemplo, la selva que recorre la costa oriental se redujo en un 66 por ciento entre 1900 y 1985.



FUENTES: *Glen M. Green, Robert W. Sussman, H. Humbert y G. Cours Darne*




3. TIERRAS QUEMADAS para usos agrícolas (*izquierda*). La técnica de tala y quema empezó con la llegada de colonos a Madagascar, hace menos de 2000 años. La deforestación masiva por culpa del maderero ha provocado la erosión de muchas laderas (*derecha*). La pérdida de hábitats por estas prácticas explica la desaparición de las grandes especies de aves y mamíferos.

cambio climático de la extinción, ante la observación de que muchas localidades subfósiles corresponden a lagos o marismas desecados. Pero nunca pareció razón suficiente que las extinciones se debieran a la desecación. Lo que no ha disminuido el interés reciente por un posible efecto climático, al haberse demostrado la notable antigüedad de ciertas praderas del centro de la isla, anteriores sin duda a la colonización humana.

Los testigos de sedimentos lacustres, analizados por David A. Burney muestran que, como cualquier otra región de la Tierra, Madagascar ha experimentado fluctuaciones climáticas a lo largo de los últimos miles de años. Al final de la postrera era glacial, hace unos 10.000 años, los bosques malgaches comenzaban a recuperarse tras un período de contracción. No debe, pues, sorprendernos que no todo fuera bosque en las tierras altas centrales por la época en que llegaron los humanos.

El estrés climático y la consiguiente reducción y redistribución de los bosques constituyen así un posible factor de la desaparición de la fauna subfósil. Pero es evidente que la isla, como cualquier otro sitio, ha sufrido perturbaciones periódicas de ese tipo a lo largo del tiempo. Los linajes ancestrales de los lémures extinguidos sobrevivieron a estas primeras vicisitudes, y no hay razón para creer que por sí sola la tanda de cambios climáticos más recientes (y bastante suaves) hubiera de tener un efecto fatal simultáneo sobre diversos linajes. Lo que resulta particularmente cierto cuando consideramos que la mayoría de los lémures subfósiles eran, a buen seguro, generalistas desde el punto de vista ecológico. *Megaladapis, Palaeopropithecus* y *Archaeolemur*, entre otros, vivían en ambientes que iban desde condiciones húmedas a áridas, tratándose, además, de animales adaptables a los distintos hábitats. De ahí que no baste apelar a un ciclo de perturbación del hábitat natural para explicar la desaparición de los lémures gigantes. Sólo nos queda un factor completamente nuevo: *Homo sapiens*.

Hablar del "episodio de extinción" de los lémures de gran tamaño supone que este proceso ha terminado. Nada menos cierto. Los lémures extinguidos y los actuales forman parte de un mismo proceso inacabado. Los lémures minúsculos y más ligeros han pervivido hasta hoy, pero se encuentran también sometidos a la presión creciente de una población humana en expansión. El diezmo de la caza aumenta con la población humana y el uso de mejores armas. Merece su propia consideración los movimientos demográficos, que tienden a socavar las creencias locales, protectoras, en determinados sitios, de diversas especies.

Todavía más preocupante es la destrucción de los hábitats por desbroce y quema para fines agrícolas, así como la tala de árboles para leña de consumo energético y comercio forestal. La zona más amplia de bosque continuo se encuentra a lo largo del escarpe húmedo oriental. Mediante el análisis de documentos históricos y de imágenes de satélite, Glen M. Green y Robert W. Sussman han demostrado que el 66 por ciento de la región cubierta por esta selva al iniciarse el siglo estaba ya perdida hacia 1985. Dentro de otros 35 años, calculan, sólo habrá árboles en las laderas empinadas del escarpe. En las regiones occidental y meridional de la isla, más llanas, la tasa de desaparición del bosque avanza a un ritmo más rápido.

Estas presiones se ejercen desde hace decenios. En los años veinte, las autoridades coloniales establecieron uno de los primeros sistemas mundiales de reserva natural. Pero, al tratarse de uno de los países más pobres del planeta, Madagascar no puede, por mucho que quiera su gobierno, gestionar adecuadamente (o, a veces, en absoluto) tales reservas. Para nuestra fortuna, la isla ha atraído, en los últimos años, la atención de la comunidad internacional dedicada a la conservación. El país figuraba recientemente en uno de los primeros trueques de "deuda por naturaleza", en los que parte de la deuda exterior se condona a cambio de la protección de áreas naturales.

Son las necesidades reales e inmediatas de las comunidades locales, paupérrimas, las que se satisfacen con la destrucción forestal; y en numerosos casos, los acuerdos a gran escala sobre conservación han de salir todavía de los despachos gubernamentales para convertirse en proyectos reales sobre el terreno. A medida que se avance en esa dirección, podremos albergar esperanzas de que la destrucción se estabilice e incluso se invierta la tendencia a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LEMURS LOST AND FOUND. Patricia C. Wright, en *Natural History*, 97 (7), págs. 56-60. 1988.

MADAGASCAR'S LEMURS: ON THE EDGE OF SURVIVAL, Alison Jolly, en *National Geographic*, 174 (2), págs. 132-161. 1988.

MADAGASCAR: A NATURAL HISTORY. Ken Preston-Mafham. Facts on File. 1991.

Puntos cuánticos

Los expertos en nanotécnica confinan electrones en estructuras puntuales. Estos "átomos de diseño" podrían dar lugar a nuevos dispositivos electrónicos y ópticos

Mark A. Reed

En los últimos años, la investigación de los semiconductores ha adquirido nuevas dimensiones. Entiéndase esto casi al pie de la letra: la segunda, la primera y la nula. Ciertos dispositivos recientes confinan electrones en planos o líneas. Más aún, algunos pueden hacerlo incluso en puntos matemáticos: el resultado es lo que llamamos puntos (*dots*) cuánticos.

Los fabricantes de microcircuitos han desarrollado técnicas de nanofabricación, capaces de crear estructuras casi átomo a átomo, que han abierto un nuevo campo de la física y química fundamentales. Gracias a ellas, los investigadores pueden construir y estudiar equivalentes artificiales de átomos, moléculas y cristales, y no han de limitarse ya a las formas, distribuciones de carga y tamaños atómicos que la naturaleza ofrece.

Pero los puntos cuánticos no sólo presagian una ciencia apasionante; cabe esperar, además, que sus propiedades serán aprovechadas para diversos usos ópticos y electrónicos. Podrían construirse conjuntos de puntos densamente empaquetados para substrato de computadores cuya capacidad no tendría precedentes. Los puntos podrían también formar materiales capaces de absorber y emitir luz a cualquier conjunto de longitudes de onda que especifiquen sus diseñadores, o, incluso, servir de base a láseres semiconductores más eficientes y sintonizados con más precisión que cualquiera que exista hoy.

Los planos, las líneas y los puntos son construcciones matemáticas. No tienen extensión física. ¿Cómo se convierten estos objetos mentales en objetos físicos, hechos con materiales reales de tres dimensiones? La respuesta está en la mécanica cuántica y en el principio de incertidumbre de Heisenberg. La posición y el momento de un electrón no pueden conocerse a la vez con precisión arbitraria. A medida que un electrón se va confinando más estrechamente, su momento es más incierto. Este intervalo de momentos más amplio da lugar a una energía media superior. Si un electrón se confinara en una capa ideal sin grosor alguno, su energía sería también infinita. En los semiconductores, en general, la energía de los electrones está limitada por su temperatura y por las propiedades del material. Pero cuando los electrones se confinan en una capa suficientemente delgada, las exigencias del principio de incertidumbre predominan. Mientras los electrones carezcan de energía para escapar del confinamiento, se comportarán como si fuesen bidimensionales.

No es sólo una manera de hablar. Los electrones confinados en un plano no tienen libertad de movimiento en la tercera dimensión; los confinados en un alambre cuántico sólo son libres en la primera, y los confinados en un punto cuántico, en ninguna. En los semiconductores corrientes, la escala de longitud de un electrón de conducción libre es de unos cien angstroms (un angstrom es 10^{-10} metros, aproximadamente el radio de un átomo de hidrógeno). Un electrón que está dentro de un cubo de material semiconductor de cien angstroms de lado se halla, esencialmente, confinado en un punto.

La ingeniería de semiconductores de menos de tres dimensiones se inicia a comienzos de los años setenta, cuando se consiguen los primeros "pozos cuánticos" bidimensionales. Estas estructuras, construidas por medio de técnicas epitaxiales de película delgada, que forman un semiconductor mediante capas sucesivas de un solo átomo, son finas regiones de material semiconductor (normalmente arseniuro de galio y compuestos relacionados) que atraen a los electrones. La energía de los electrones que están dentro del pozo es más baja que la energía de los que residen en otras partes, de manera que los electrones fluyen hacia dentro, tal y como el agua baja por una pendiente hacia un pozo profundo. Es posible también crear barreras cuánticas, "colinas" bidimensionales de material que repelen a los electrones. Tomados en combinación, los pozos y las barreras sirven para construir estructuras complejas que antes sólo existían en los ejemplos de los manuales de mecánica cuántica (véase "Nanotécnica", por Elizabeth Corcoran; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1991). Hoy en día los pozos cuánticos se han convertido en algo corriente. Son, por ejemplo, la base de los diodos láser de los reproductores de disco compacto, así como de los sensibles receptores de microondas que registran las señales procedentes de las antenas de los satélites.

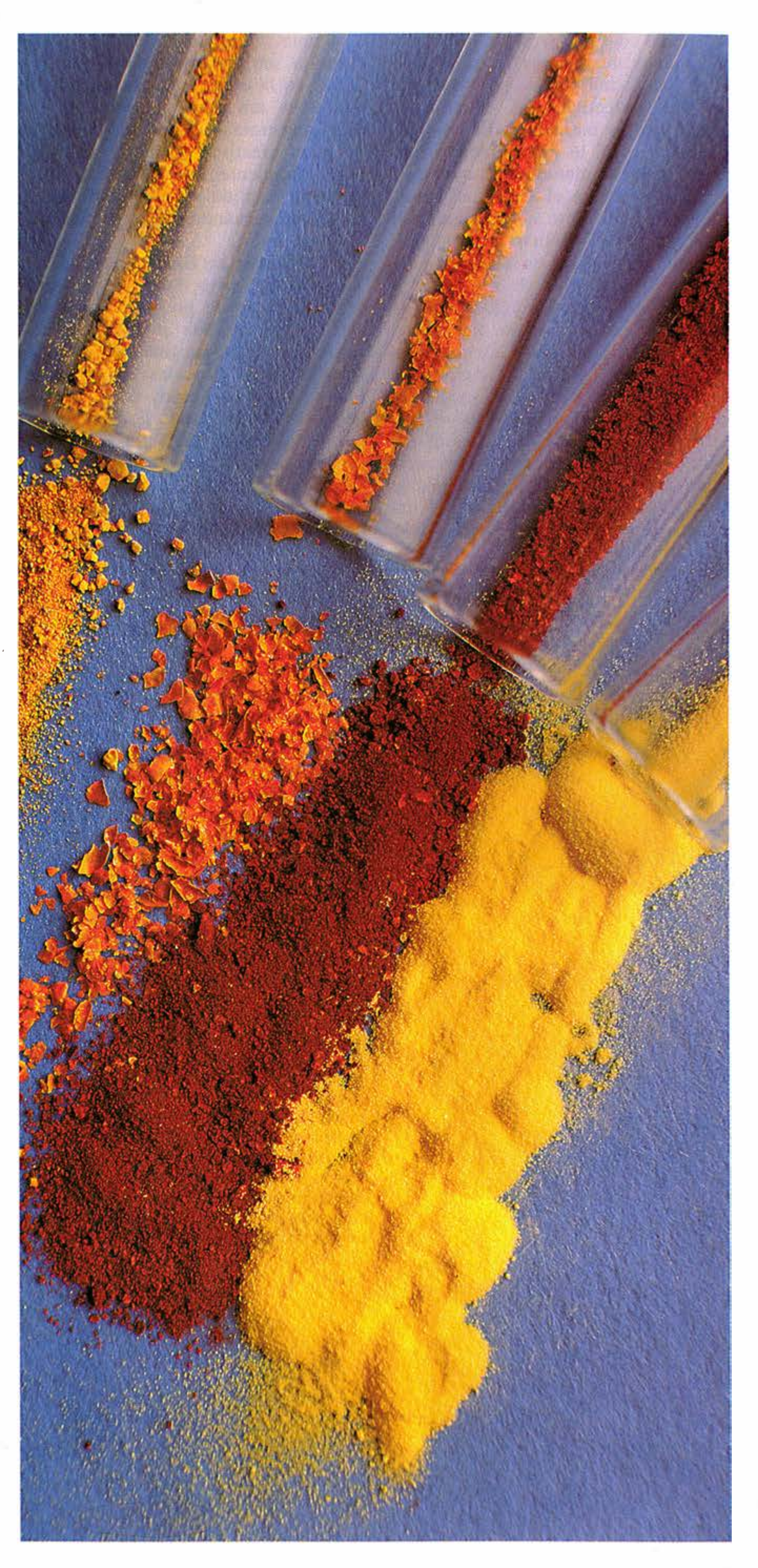
Los primeros atisbos de que era posible el confinamiento cuántico en cero dimensiones se remontan a comienzos de los años ochenta, cuando A. I. Ekimov y sus colaboradores, del Instituto Fisicotécnico Ioffe de San Petersburgo, observaron unos insólitos espectros ópticos en muestras de vidrio que contenían sulfuro de cadmio o seleniuro de cadmio, semiconductores ambos. Las muestras habían sufrido altas temperaturas; Ekimov sugirió que el calentamiento había provocado que se precipitasen nanocristalitas del semiconductor en el vidrio, y que la cau-

MARK A. REED estudia sistemas semiconductores mesoscópicos, que son aquellos cuyo comportamiento mezcla características clásicas y cuánticas. Tras doctorarse en física del estado sólido en la Universidad de Syracuse en 1983, pasó a Texas Instruments. Su equipo realizó allí, en 1987, los primeros puntos cuánticos por el procedimiento litográfico. Desde 1990 es profesor de ingeniería eléctrica en la Universidad de Yale.

sa del singular comportamiento óptico era el confinamiento cuántico de los electrones en estos cristales. A fin de comprender esta línea de razonamiento, imaginemos un electrón atrapado en una caja. La mecánica cuántica establece que el electrón tiene propiedades ondulatorias. De la misma manera que una cuerda de violín está sujeta por ambos extremos, la onda del electrón está limitada por las paredes de la caja. La longitud de onda de las vibraciones de la cuerda (o del electrón) se debe ajustar a esos límites. El punto en el que la cuerda de un violín está sujeta cambia cuando el dedo del violinista sube por el mástil. La longitud de la onda resultante se acorta, y la frecuencia de las vibraciones de la cuerda aumenta al igual que la de todos sus armónicos. Si mengua el tamaño de la caja que confina el electrón, el nivel energético más bajo del electrón (el análogo del tono fundamental del violín) aumentará. En el caso de las nanocristalitas semiconductoras, el "tono" fundamental es la energía umbral de absorción óptica, y los armónicos indican nuevas características de absorción a energías más elevadas.

¿Cuán pequeña debe ser una nanocristalita para que el fenómeno resulte visible? En el vacío, los efectos del confinamiento empezarían a dejarse notar cuando el electrón estuviera atrapado en un volumen de 10 angstroms de diámetro. A este tamaño corresponde una longitud de onda del electrón de unos 20 angstroms y, por tanto, una energía en torno a una cuadragésima de electronvolt.

La longitud de onda de un electrón depende de su energía y de su masa. Para una longitud de onda dada, cuanto menor sea la masa, mayor será la energía y más fácil observar el desplazamiento energético que el confinamiento causa. Los potenciales electrostáticos de los átomos de la red cristalina se superponen, y se produce un medio donde



1. AL CONFINAMIENTO CUANTICO se deben los colores de las cristalitas de seleniuro de cadmio, cada uno de ellas de unos pocos nanómetros, sintetizadas por Michael L. Steigerwald, de los Laboratorios AT&T. Los electrones de las pellas de semiconductor dispersan los fotones cuya energía es menor que un mínimo determinado por el tamaño del cristal, y absorben aquellos cuya energía es superior. Los cristales mayores absorben fotones de menor energía, y por eso se les ve rojos; a los menores, que sólo absorben cuantos de mayor energía, se les ve amarillos.

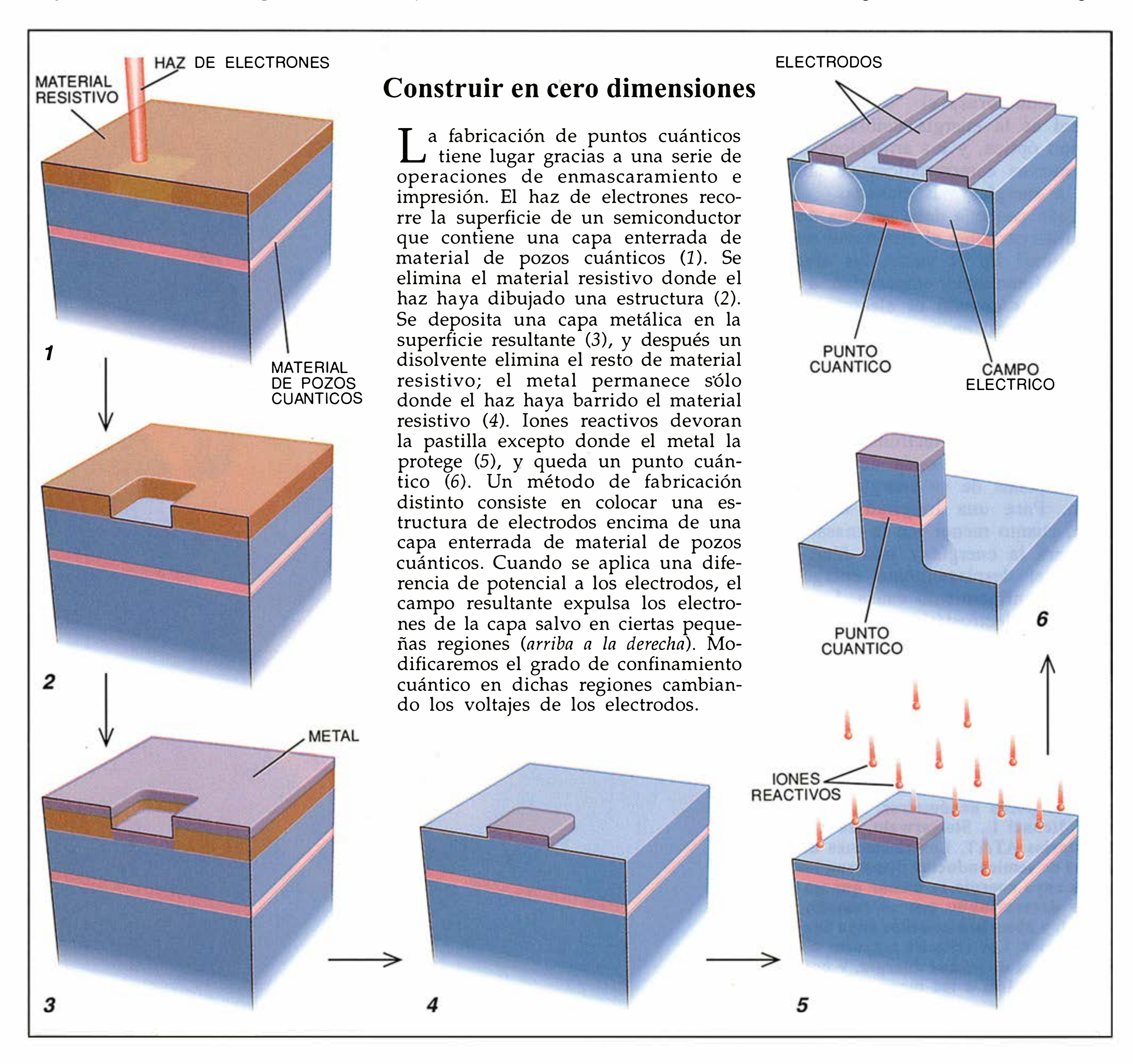
las ondas del electrón se propagan con menos inercia que en el espacio libre; en dicho medio, por lo tanto, la "masa efectiva" del electrón es menor que la masa real. En el arseniuro de galio, la masa efectiva ronda el siete por ciento de lo que sería en el vacío, y en el silicio, el catorce por ciento. Por consiguiente, el confinamiento cuántico en semiconductores tiene lugar en volúmenes de unos cien angstroms de diámetro.

El umbral de absorción óptica en las nanocristalitas de este tamaño se desplaza a energías más altas, alejándose del extremo rojo del espectro, a medida que la cristalita se empequeñece. Este fenómeno se manifiesta hermosamente en los agregados de seleniuro de cadmio: conforme se va acortando su diámetro, pasan gradualmente del rojo oscuro al naranja y del naranja al amarillo, como puede verse a simple vista con claridad. (Una cuestión intrigante y todavía por resolver es la de qué sucede cuando el cristal es tan pequeño —menos de diez angstroms—, que el concepto de masa efectiva, deducido para sólidos suficientemente grandes, deja de tener sentido. No se han hecho aún puntos cuánticos tan pequeños.)

La hipótesis de Ekimov resultó ser correcta, pero dar con las técnicas adecuadas de preparación de vidrios y mostrar de manera convincente que había confinamiento cuántico habría de llevarles aún años de trabajo a varios grupos de investigadores. Mientras, Louis E. Brus y sus colaboradores se dedicaron a obtener suspensiones coloidales de nanocristalitas precipitando soluciones que contenían los elementos que constituyen los semiconductores.

Tales cristalitas crecen por adición de iones individuales, hasta que termina su suministro. El grupo de Brus controlaba el tamaño del precipitado, en un margen de 15 a unos 500 angstroms, sólo con parar la precipitación una vez pasado cierto tiempo. En cada partida los tamaños no variaban en más de un quince por ciento. Como en el caso de las nanocristalitas en vidrio, un llamativo desplazamiento de la energía de absorción fundamental a un nivel más alto fue la señal de que se había producido el confinamiento cuántico.

Investigadores del mundo entero han mejorado este método: A. Paul Alivisatos y sus colaboradores ampliaron el número de elementos a partir de los cuales pueden formarse cristalitas al lograr la precipitación de compuestos III-V, como el arseniuro de galio; Michael L. Steiger-



Construir en cero dimensiones

La fabricación de puntos cuánticos tiene lugar gracias a una serie de operaciones de enmascaramiento e impresión. El haz de electrones recorre la superficie de un semiconductor que contiene una capa enterrada de material de pozos cuánticos (*1*). Se elimina el material resistivo donde el haz haya dibujado una estructura (*2*). Se deposita una capa metálica en la superficie resultante (*3*), y después un disolvente elimina el resto de material resistivo; el metal permanece sólo donde el haz haya barrido el material resistivo (*4*). Iones reactivos devoran la pastilla excepto donde el metal la protege (*5*), y queda un punto cuántico (*6*). Un método de fabricación distinto consiste en colocar una estructura de electrodos encima de una capa enterrada de material de pozos cuánticos. Cuando se aplica una diferencia de potencial a los electrodos, el campo resultante expulsa los electrones de la capa salvo en ciertas pequeñas regiones (*arriba a la derecha*). Modificaremos el grado de confinamiento cuántico en dichas regiones cambiando los voltajes de los electrodos.

wald, como muchos otros, estabiliza la superficie de los cristales semiconductores con una envoltura orgánica, una "burbuja de jabón", a la que se da el nombre de micelio inverso; diversos grupos rellenan con agregados de átomos las cavidades de tamaño nanométrico de las zeolitas, lo que permite un preciso control dimensional.

Encerrar los nanocristales dentro de otro material podría mejorar su comportamiento cuántico. Las partículas de semiconductor tienen un cociente superficie-volumen muy grande, y las superficies, en general, están constituidas por átomos con enlaces químicos sueltos. Estos enlaces mal cerrados pueden hacer de amortiguadores y absorber la energía de electrones que vibren en modos de más alta energía (longitudes de onda más cortas). De ahí que muchas nanocristalitas no presenten las series armónicas de niveles de energía que se esperaría exhibiese un punto cuántico.

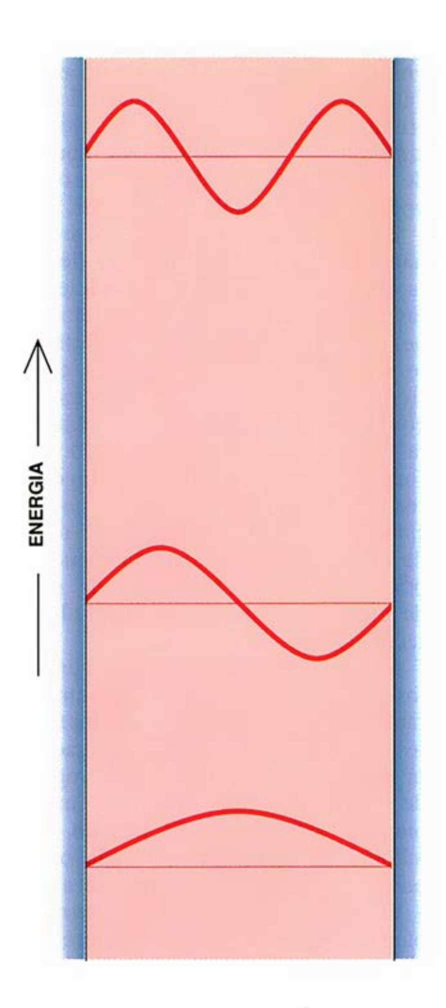
Las dificultades inherentes a la construcción de puntos cuánticos a partir de agregados de átomos provocaron que, a mediados de los años ochenta, se buscasen otros principios de fabricación. Mis colaboradores y yo hicimos los primeros puntos cuánticos litográficos en 1987, cortando pastillas de material de pozos cuánticos en pilares mediante técnicas de impresión avanzadas, parecidas a las utilizadas en la fabricación de los actuales circuitos integrados, salvo que las técnicas ópticas se sustituyen por la litografía de haz de electrones. Un haz de electrones —efectos similares se logran también con rayos X o haces de iones— recorre la superficie de un semiconductor recubierto con una fina capa de un polímero resistivo ("resist"). A continuación, una serie de procesos va reemplazando el material resistivo por una capa delgada de metal en las zonas barridas con intensidad por el haz. Una ducha de gas reactivo elimina el material de pozos cuánticos sin proteger, y deja los pilares. Así se pueden construir con bastante facilidad pilares u otras estructuras de un tamaño de hasta 1000 angstroms. Pero el proceso se hace cada vez más difícil a medida que la escala baja a unos 100 angstroms, que es el límite del material resistivo mejor conocido.

Por encima y por debajo del material de pozos cuánticos de estos pilares están las barreras túnel, capas aislantes ultrafinas, a las que siguen contactos conductores. Los aislantes confinan los electrones en el pozo durante mucho tiempo; pero, finalmente, los electrones pueden entrar y salir por efecto túnel, produciendo una pequeña corriente, que revela los estados de energía internos del pozo. Siempre que el voltaje a través del pozo coincida con la energía de uno de sus estados resonantes, aumenta el flujo de corriente. Cuando el diámetro del pilar es muy pequeño, el espectro de corriente-voltaje presenta la serie armónica de picos característica del confinamiento cuántico. Basta, de hecho, construir un único pilar, aislado de su entorno, para que se puedan calcular las propiedades hasta de un solo punto cuántico. Cuesta imaginar cómo podría llevarse a cabo esta tarea con nanocristalitas.

Además, el proceso de fabricación litográfica reviste el punto cuántico y lo protege de efectos de superficie al menos por dos caras. Las partes de arriba y de abajo del punto cuántico son interfases de monocristal construidas mediante epitaxia avanzada, y son esencialmente perfectas. Dado que el pilar conduce la electricidad, los enlaces en superficie del semiconductor que utilizamos crean una carga positiva con respecto al núcleo interno del pilar. Esta carga repele hacia el interior, confinado cuánticamente, los electrones de la superficie; la zona de la que han partido los electrones forma una funda aislante en torno al pilar, que protege los lados del punto. Un pilar de 1000 angstroms contendría así un punto de 100 angstroms.

La realización de un punto cuántico depende de que la funda aislante tenga el espesor correcto, relacionado a su vez con el tamaño del pilar impreso; pero, ¿qué espesor es el correcto? Cuando nos propusimos crear puntos cuánticos, nadie lo sabía. Fracasamos muchas veces, hasta que el 20 de agosto de 1987, estando yo a punto de dar una charla sobre dispositivos de pozos cuánticos, mis colaboradores me comunicaron que habían logrado medir por fin un punto cuántico.

Medidas subsiguientes confirmaron que puntos de tamaños diferentes producían espectros armónicos distintos, clara señal del confinamiento cuántico. Desde entonces, grupos de varios países han empleado también esta técnica. El de Pierre Gueret ha logrado incluso un punto "comprimible" mediante la colocación de un conmutador electrónico en torno al punto; toda una hazaña. Cuando se eleva el potencial eléctrico del conmutador aumentan la energía fundamental y los armónicos de su espectro, y el punto empequeñece.



2. UN ELECTRON encerrado en una caja tiene una función de ondas cuántica que se ajusta con regularidad entre sus bordes. El nivel de energía más bajo corresponde a una onda estacionaria con un único antinodo; el siguiente, a una onda con dos, y así sucesivamente. La energía del electrón es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda; los niveles de energía aumentan muy deprisa. Esta serie armónica de niveles de energía es señal de un punto cuántico.

El éxito de estas mediciones eléctricas en puntos cuánticos definidos litográficamente, comparado con la dificultad que entrañan las mediciones ópticas de puntos constituidos por microagregados atómicos, demuestra cuán importante es controlar los dañinos efectos de superficie. Varios grupos han logrado eliminarlos por completo. Hacen puntos cuánticos instalando pequeños electrodos conmutadores encima de una capa enterrada que confina los electrones en dos dimensiones. Los electrodos comprimen los electrones en "islas" cuánticamente confinadas.

Una ventaja de este método es que se pueden poner en el punto cuantos electrones se desee, muchos o pocos, mediante una variación del

voltaje compresor. El resultado es un "átomo de diseño": el potencial confinante actúa a modo de núcleo atractivo, y la valencia (el número de electrones) se determina por el voltaje externo del conmutador.

En los átomos naturales, el confinamiento de los electrones se debe a la fuerza electrostática del núcleo, y las funciones de onda de los electrones son, en consecuencia, radialmente simétricas. En estos puntos cuánticos la forma de los electrodos conmutadores determina el tamaño, la forma y la simetría del perfil confinante. Gracias a ello los "ingenieros de funciones de onda" pueden estudiar una física atómica que no se da en la naturaleza espontáneamente; por ejemplo, las funciones de onda de electrones en átomos cuadrados o rectangulares.

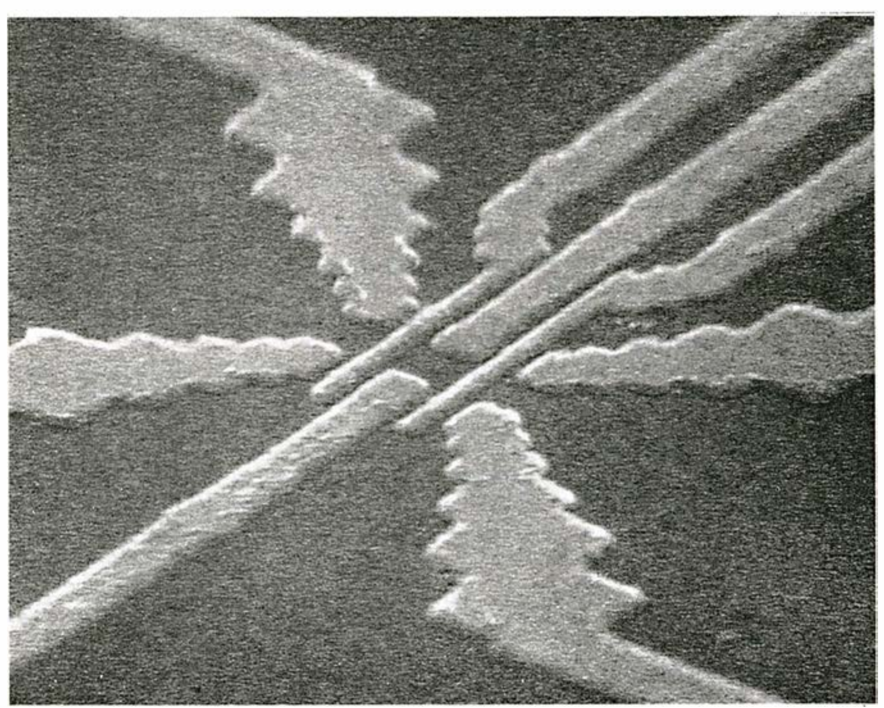
Se han construido grandes conjuntos periódicos de puntos mediante la fabricación de electrodos conmutadores en rejilla. El voltaje aplicado a la rejilla produce una malla regular de confinamientos cuánticos en el material subyacente. El tamaño y el número de electrones en cada punto puede controlarse, así como la altura y el espesor de la barrera entre los puntos. Aparecen picos regulares en el espectro de absorción óptica de estas estructuras. Este sorprendente fenómeno atestigua la precisión con la que se han hecho los conjuntos, algunos de los cuales contienen más de un millón de puntos, ya que cualquier variación en el tamaño difuminaría el espectro armónico. Ray C. Ashoori y Horst L. Störmer han medido recientemente la capacitancia de los puntos individuales, y han demostrado que se puede capturar un único electrón en cada punto. Es posible, por tanto, añadir los electrones de uno en uno, como si de un procedimiento digital se tratase.

Estos resultados abren la posibilidad de hacer una red plana artificial en la que se controlasen las propiedades de los "átomos" constituyentes. De la misma manera que los puntos cuánticos individuales presentan niveles de energía análogos a los de los átomos, una red artificial poseería una estructura de bandas de energía similar a la de un semiconductor cristalino. Podría utilizarse para estudiar muchos problemas de física cuántica y también constituir la base de un oscilador electrónico ultrarrápido.

Pero no hay nadie que haya podido hacer una red plana, ni quien haya mostrado su estructura de bandas. El éxito exigirá no sólo una precisión exacta en la fabricación de la rejilla electrodo, sino también un control extremo de los defectos del material de pozos cuánticos subyacente. En las redes naturales semiconductoras, los ingenieros cuentan con que todos los átomos de silicio son idénticos, pero en una red artificial deberán imponer esa uniformidad con trabajo.

Un intrigante cambio de perspectiva en este campo es la red de "antipuntos". Al invertir el voltaje de la rejilla, las islas repelen a los electrones en vez de atraerlos; ello fuerza a los electrones a residir en el espacio que queda, evitando en su movimiento por la red los antipuntos, como si de una diminuta "máquina de bolas" se tratase.

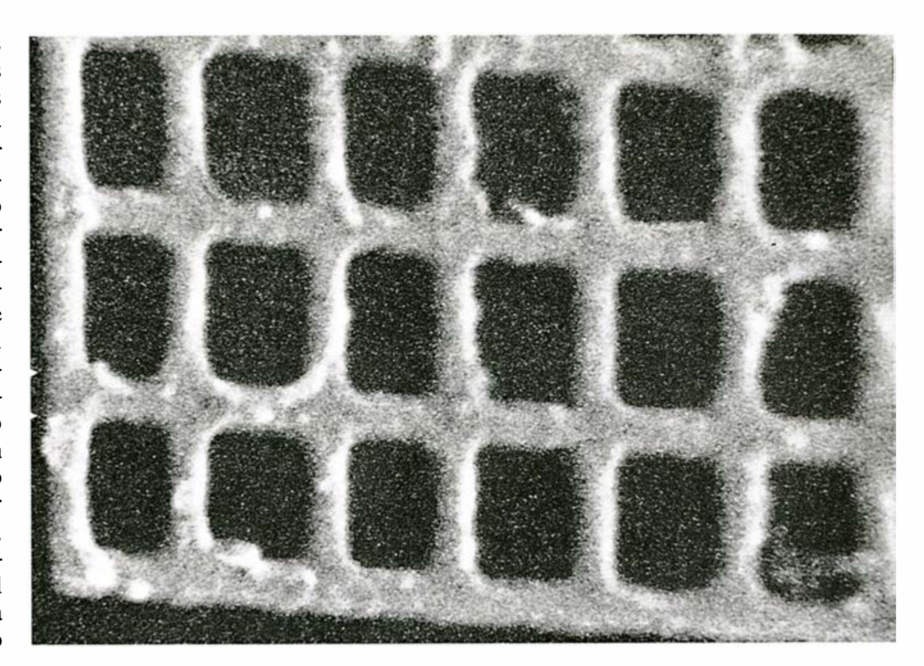
En otra variante de la técnica de la rejilla, debida a Kathleen Kash y colaboradores, el confinamiento cuántico lo imponen fuerzas compresivas, no los electrodos. Se dispone una capa tensada (una capa cuya red atómica tiene un espaciado distinto del que presenta el substrato) sobre el material de pozos cuánticos, comprimiéndolo lateralmente. A continuación, se imprime una estructura en la capa tensada; cuando la capa se elimina, la tensión compresiva desaparece. Las minúsculas variaciones resultantes en el espaciado atómico de la capa de pozos cuánticos provocan cambios en los niveles de energía de los electrones, lo que da lugar a que se produzcan puntos cuánticos.



3. HAY UN PUNTO CUANTICO AJUSTABLE enterrado en la intersección de los electrodos de la microfotografía. Los cuatro electrodos interiores "comprimen" los electrones de la enterrada capa de pozos cuánticos hasta introducirlos en el punto. Los electrodos exteriores son contactos a través de los cuales los electrones entran y salen del punto por efecto túnel; la tasa de dicho proceso de tunelización se intensifica cuando las energías de los electrones igualan los niveles energéticos del punto. A su vez, dichos niveles pueden controlarse cambiando el voltaje de los electrodos interiores.

La compresión electrostática genera puntos cuyo confinamiento cuántico puede manejarse con más facilidad que el de los puntos producidos por otros métodos. En los tres últimos años varios equipos de investigadores han logrado algo hasta ahora imposible: contactos laterales con un punto solo, consistentes en barreras túnel controladas por medios electrostáticos. Esta estructura le da al investigador el dominio de muchas de las variables que definen el punto, entre ellas el tamaño, el número de electrones y la transparencia de las barreras confinantes. No hay nada mejor para contrastar algunos problemas típicos de los manuales como las propiedades de los estados de cero dimensiones o la probabilidad de que los electrones crucen barreras por efecto túnel. La unión de dos puntos para formar una molécula artificial permite investigar el acoplamiento de los estados de puntos cuánticos contiguos. Y según ha demostrado Leo P. Kouwenhoven, hasta es posible unir muchos puntos entre sí, a modo de collar de perlas, para generar un cristal artificial unidimensional y observar la formación de la estructura de bandas de energía de un cristal.

Se ha descubierto que los niveles de energía de estos pequeños puntos están determinados no sólo por las reglas de la mecánica cuántica basadas en el tamaño, sino también por la cuantización de la carga del electrón (véase "Control del movimiento individual de los electrones", por Konstantin K. Likharev y Tord Claeson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1992). El nivel energético de un punto depende en parte de su capacitancia y de la cantidad de carga contenida en su interior; la cantidad de carga debe ser un múltiplo de *e*. Que haya cuantización de un tipo y del otro provoca un complejo entrelazado de efectos. Para saber cuál de los dos será más importante, hay que conocer, además de la longitud de onda y la masa efectiva del electrón en el punto, su capacitancia eléctrica. Si se ha formado un punto a partir de una partícula metálica, tendrá muchos más electrones de conducción, cuya longitud de onda es de sólo unos angstroms, que un semiconductor. Por consiguiente, en un punto metálico de cien angstroms la cuantización de la carga ejerce un efecto mucho más intenso, relativamente hablando, que la cuantización del tamaño. Sin embargo, la capacitancia del punto metálico no es tan diferente de la de un punto semiconductor del mismo tamaño, y en el semiconductor las energías de los dos efectos pueden ser casi iguales.



4. UNA REJILLA DE ELECTRODOS crea una malla de puntos cuánticos en el material que está bajo ella. Dicha red es, en concreto, una capa cristalina formada por átomos artificiales cuyos niveles de energía pueden controlarse con precisión. Los conjuntos de puntos cuánticos son de utilidad en el estudio de física fundamental, y quizás encuentren aplicación en nuevos dispositivos electrónicos u ópticos.

Estos descubrimientos sólo llegarán a tener valor comercial si se mejoran las técnicas de fabricación. La dificultad más seria es el control del tamaño y la pureza de las nanoestructuras. El método de fabricación "de arriba abajo" (grabar, cortar o comprimir semiconductores) servirá de poco en caso de que no se produzcan avances revolucionarios en los materiales y en la nanofabricación. Los prototipos existentes de dispositivos, demasiado grandes, sólo funcionan a temperatura muy baja. (Aunque el tamaño de la región activa del dispositivo es de orden cuántico, los electrodos y los contactos ocupan un espacio enorme.) Estos dispositivos se construyen con litografía de haz de electrones, técnica de fabricación que no sirve para construir el número de circuitos complejos que la rentabilidad económica requiere. Se necesitan nuevos instrumentos litográficos que permitan un control tridimensional a escala atómica, tales como el crecimiento epitaxial estructurado o el ensamblamiento molecular autoorganizado. Quizá haya que crear nuevos materiales y técnicas de síntesis que mezclen la técnica tradicional de semiconductores con métodos nuevos. A este propósito, se han construido en Japón alambres y puntos cuánticos a partir de polímeros orgánicos. La ubicación de los átomos conductores en las moléculas del polímero es fija, por lo que este método ofrece un control mucho más fino del que permite la litografía de haz de electrones. Si se llegara a demostrar que el ensamblaje de dispositivos cuánticos "de abajo arriba" es factible, los métodos actuales de construcción de puntos cuánticos acabarían por parecernos tan extraños como una biblioteca cuyos libros se hubiesen fabricado labrando un bloque de madera gigantesco.

Con todo, el reto principal no consiste en la construcción en masa de dispositivos confinados cuánticamente, sino en diseñar circuitos que exploten las posibilidades que encierran. El límite técnico del tamaño de los dispositivos cuánticos es, en teoría, mucho menor que el proyectado para los de silicio. Pero su viabilidad dependerá de la suerte que corran cuando les toque enfrentarse en el mercado a los nuevos productos que la técnica del silicio irá ofreciendo a lo largo de la década que viene.

A imagen de los transistores actuales, cuya misión nada tiene que ver con su aplicación radiofónica originaria, los dispositivos cuánticos podrían hallar sentido lejos de la computación digital y las comunicaciones. Si los ingenieros pudiesen fabricar redes que contuviesen miles de millones de puntos cuánticos, cada uno con un tamaño y una forma prefijados, materializarían cualquier compuesto electrónico u óptico que concibieran, dándole con precisión los espectros de emisión, de absorción y de láser que escogiesen. Podrían diseñar incluso láminas de material que poseyeran miríadas de computadores, cuyas interconexiones y arquitectura interna cambiarían con los problemas presentados.

Los puntos cuánticos son subyugantes. ¿Por su utilidad práctica, por los nuevos campos que abren? La razón es más universal. ¿A quién no le arrastra la idea de domeñar la naturaleza, incluso a escala atómica, y vencer las leyes que le han dado forma?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TENDENCIAS EN MATERIALES: NANOTÉCNICA. Elizabeth Corcoran en *Investigación y Ciencia*, número 172, págs. 76-86, enero de 1991.

ENGINEERING A SMALL WORLD: FROM ATOMIC MANIPULATION TO MICROFABRICATION. Sección especial de *Science*, vol. 254, páginas 1300-1342, 29 de noviembre de 1991.

QUANTUM SEMICONDUCTOR STRUCTURES: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. Claude Weisbuch y Borge Vinter. Academic Press, 1991.

NANOSTRUCTURES AND MESOSCOPIC SYSTEMS. Dirigido por Wiley P. Kirk y Mark A. Reed. Academic Press, 1992.

Donald O. Hebb, teórico de la mente

Señalando la raíz del comportamiento en las ideas y la de éstas en el cerebro, Hebb sentó las bases de la neurología moderna. Su teoría prefiguró los modelos informáticos de redes neurales

Peter M. Milner

Donald O. Hebb, uno de los más influyentes psicólogos de su tiempo, quería ser novelista. Convencido de que su vocación requería sólidos conocimientos psicológicos, se embarcó en una carrera que le llevó a dedicarse durante veinte años a la investigación. Sus estudios culminaron en 1949 con la publicación de su obra *The Organization of Behavior* ("La organización de la conducta"), piedra angular de la moderna neurofisiología.

La monografía abrió un nuevo camino, postulando estructuras neurales a las que daba el nombre de conjunciones o asambleas celulares, establecidas mediante la hoy llamada "sinapsis de Hebb". La teoría de la conjunción celular guió a Hebb en sus experimentos sobre el influjo del ambiente precoz en la inteligencia del adulto. Y prefiguró la teoría de las redes neuronales.

El libro apareció en el momento más oportuno, porque se enfrentaba al conductismo, justo cuando esa escuela comenzaba a perder la hegemonía. Los conductistas eran contrarios a que se explicase el comportamiento por la asociación de ideas (a lo que ellos llamaban mentalismo) y por la actividad de neuronas (a lo que llamaban fisiologismo). Pero a muchos psicólogos, cansados de las artificiosas teorías engendradas por tales críticas, les cautivó la propuesta de Hebb no menos que el atractivo estilo literario con que acertó a presentarla.

Nunca pretendió que su teoría de 1949 tuviese firmes fundamentos fisiológicos. Su modelo teórico proponía un objeto de búsqueda, y sólo después, a medida que fueron aumentando los conocimientos sobre el cerebro, se hizo posible expresar su concepción en términos neurológicos más sólidos. Ningún descubrimiento posterior ha invalidado la básica hipótesis de Hebb. Y su influencia es manifiesta en muchos sectores de la investigación actual.

Nació en Chester, Nueva Escocia, donde sus padres ejercían la medicina, carrera que siguieron sus dos hermanos y su hermana. Donald optó por estudiar inglés, dispuesto a convertirse en escritor; en 1925 se graduó por la Universidad Dalhousie de Halifax. Para ganarse la vida mientras gestaba su primera novela dio clases en su ciudad natal. Un año después se propuso ver mundo y comenzó a trabajar en explotaciones agrarias. Fracasó en su voluntad de enrolarse como marinero en un buque de carga que partía para China, y se contrató de jornalero en Quebec.

En 1927 el novelista en ciernes tenía que conocer las obras de Sigmund Freud. Así entró en contacto con la psicología. Acudió al departamento de psicología de la Universidad McGill, donde le aceptaron en 1928 como estudiante graduado y a tiempo parcial. Se mantuvo otra vez dando algunas clases y, de nuevo, lo que empezó siendo un interés temporal se transformó en especialidad profesional. Nombrado director de escuela elemental de una barriada obrera de Montreal, se mostró decidido a hacer agradable la enseñanza y, tratando de impedir que las tareas escolares sirvieran de castigo, dejaba que los alumnos revoltosos salieran de clase para desahogarse en el patio. Tanto llegaron a absorberle sus experimentos pedagógicos que consideró seriamente su permanencia en la profesión. Dos sucesos le disuadieron: una afección tuberculosa en una cadera, que le obligó a guardar cama durante un año y le dejó ligeramente cojo, y a continuación la muerte en accidente automovilístico de su prometida.

Durante su obligado reposo escribió la tesina, que le introdujo en la controversia sobre "naturaleza y cultura". En ese trabajo académico trataba de explicar los reflejos medulares como el resultado del condicionamiento pavloviano en el feto. Jamás mencionaría ese ensayo, una vez cambió de ideas y dispuesto ya a oponerse a cualquier investigación carente de fundamento experimental.

En el tribunal estaba Boris P. Babkin, fisiólogo que había trabajado

PETER M. MILNER es profesor emérito de psicología en la Universidad McGill. Licenciado en ingeniería en 1942 por la Universidad inglesa de Leeds, abandonó sus trabajos iniciales en física para doctorarse en psicofisiología en la Universidad McGill con Donald O. Hebb. Milner es codescubridor, con James Olds, del mecanismo de compensación del cerebro y ha escrito sobre sus implicaciones para las teorías del refuerzo y del aprendizaje.



1. DONALD O. HEBB se hizo famoso como teórico, pero se distinguió también como eminente profesor. Aquí le vemos en un seminario que daba por los años sesenta.

con Pavlov en San Petersburgo. Babkin le recomendó que se familiarizara con las técnicas de laboratorio y le facilitó el trabajar con Leonid Andreyev, otro ruso emigrado. Hebb se aplicó a condicionar perros y, con ello, perdió su admiración a Pavlov. Tras muchas cavilaciones sobre su futuro, decidió en 1934 quemar sus naves, pedir un préstamo e irse a Chicago a proseguir su investigación doctoral bajo la dirección de Karl S. Lashley.

Iba éste a ejercer un profundo influjo en Hebb, principalmente en su aplicación a la fisiología. Lashley nunca había puesto en duda que, para entender el comportamiento, había que entender el cerebro. Siendo mero ayudante de laboratorio, en 1910, había salvado del cubo de la basura preparaciones microscópicas de cerebros de ranas y había tratado de hallar en las conexiones neurales alguna clave de su comportamiento. Hizo también experimentos para detectar rastros de la memoria en el cerebro, ideando técnicas de inducción de lesiones cerebrales e identificación de su localización y extensión. Por los años treinta, estaba ya convencido de que los recuerdos no se almacenaban en una sola región del cerebro, sino que se distribuían por todo él. En 1934, cuando Hebb fue a Chicago, Lashley se hallaba concentrado en el estudio de la visión.

Un año más tarde le ofrecieron a Lashley una plaza en la Universidad de Harvard. Se las arregló para llevarse consigo a Hebb. Este tenía que comenzar su investigación desde el principio, y, al disponer de dinero solamente para un año más, buscaba un experimento que pudiera dar base a una tesis sin que importara cómo concluirla. Adaptó su interés por la cuestión "naturaleza-cultura" al proyecto visual de Lashley, investigando los efectos de la experiencia precoz en el desarrollo de la visión en las ratas.



En contra de las ideas empiristas de su tesina, comprobó que las ratas criadas en completa oscuridad podían distinguir el tamaño y la intensidad lumínica de ciertos patrones con la misma precisión que las criadas en condiciones normales. Esto indicaba que la organización del sistema visual era innata e independiente de las señales aportadas por el entorno, parecer coincidente con el de los psicólogos de la Gestalt, con quienes Lashley simpatizaba. Lo que Hebb no advirtió, aunque esta consecuencia iba implícita en un artículo que publicó por entonces, era que las ratas criadas a oscuras tardaban mucho más que las normales en aprender a distinguir las líneas verticales de las horizontales. Sólo años después, cuando ya habían cambiado de nuevo sus ideas acerca de la importancia relativa de los mecanismos innatos y los aprendidos, apreció en todo su alcance la importancia de esta consecuencia.

Hebb permaneció durante un año en el puesto de profesor auxiliar, lo que le permitió seguir trabajando con Lashley. En 1937 le sonrió la suerte: su hermana, que estaba preparando el doctorado en fisiología por la McGill, le avisó de que Wilder Penfield, un cirujano que acababa de establecer allí el Instituto Neurológico de Montreal, buscaba a alguien que estudiase las consecuencias de las intervenciones quirúrgicas cerebrales sobre la conducta de los operados. Solicitó y obtuvo la beca para dos años.

Penfield trataba la epilepsia localizada eliminando quirúrgicamente las zonas dañadas de la corteza. Sabía muy bien que estaba operando sobre el órgano de la mente y que cualquier movimiento en falso podía privar a su paciente del habla, de la inteligencia y hasta de la consciencia.

La principal responsabilidad de Hebb fue estudiar la naturaleza y la exten-

sión de los cambios intelectuales que se dieran en los pacientes a consecuencia de las excisiones corticales. No era un campo nuevo: comenzó después de la Primera Guerra Mundial con la aplicación de tests psicométricos a soldados que habían sufrido heridas profundas en la cabeza y continuó después sobre pacientes aquejados de tumores cerebrales. En muchos casos, las lesiones producían mermas intelectuales, pero su localización y su extensión eran difíciles de determinar. Las ablaciones quirúrgicas, por contra, se hallan mejor acotadas y los ataques epilépticos no producen daños tan generales como los causados por las balas o por los tumores.

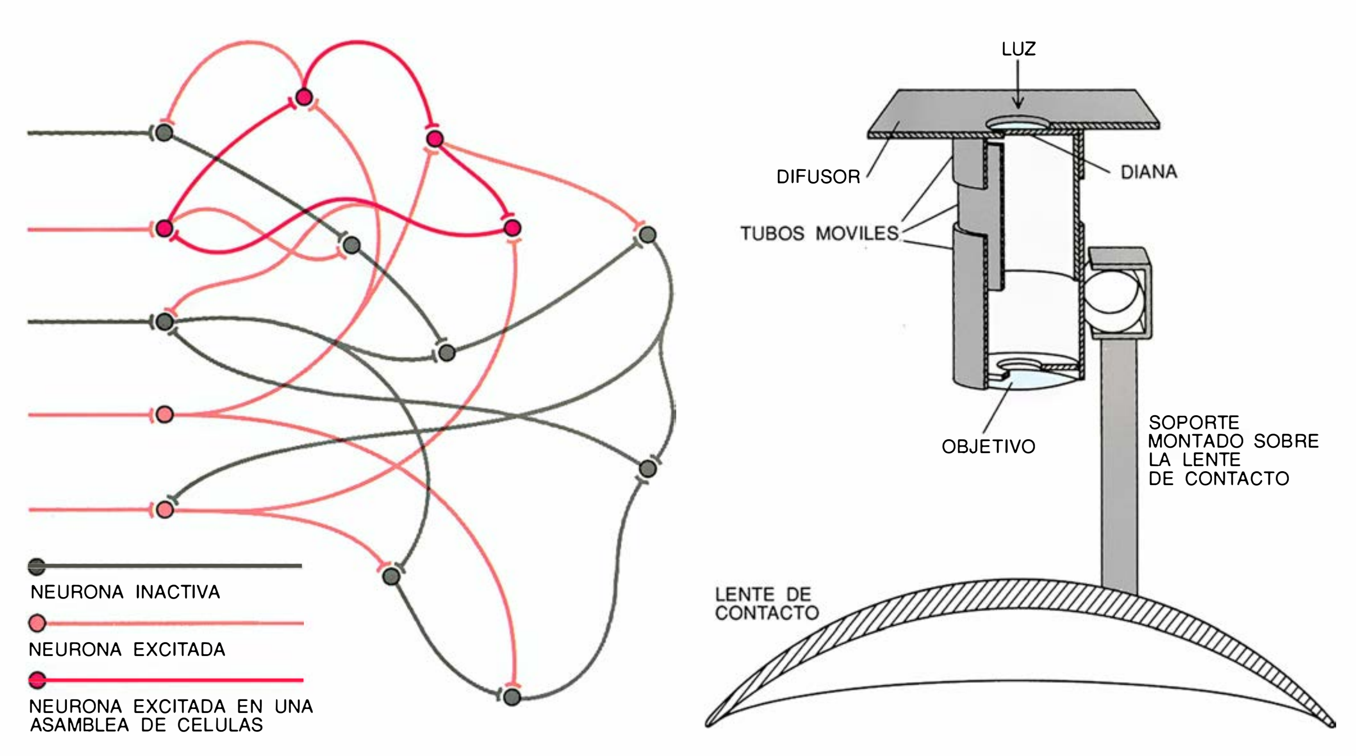
No tardó en planteársele a Hebb un peculiar problema. Los psicólogos sostenían que la sede de la inteligencia humana eran los lóbulos frontales de la corteza, basándose en que esta región de nuestro cerebro es mayor, en comparación, que las correspondientes áreas de otros animales; sin embargo, Hebb no lograba detectar pérdidas de inteligencia en pacientes cuyos lóbulos frontales habían sido destruidos por accidente o por intervención quirúrgica. Esta aparente falta de efecto le impresionó e inspiró su búsqueda de una teoría sobre el cerebro y la conducta inteligente.

Los trabajos posteriores demostraron que Hebb había puesto demasiada confianza en los tests de inteligencia al uso. Una de sus discípulas, Brenda Milner, que continuó los estudios por él comenzados de los pacientes de Penfield, descubrió que las lesiones del lóbulo frontal hacen a menudo difícil que el paciente renuncie a un comportamiento impropio. Aunque tal vez los tests de inteligencia no los detecten, los cambios de personalidad que subsiguen al deterioro del lóbulo frontal pueden afectar a la vida del sujeto.

Cuando se le acabó la beca, encontró por fin un trabajo permanente en la Universidad de Queen's en Kingston. Allí prosiguió sus investigaciones sobre la inteligencia. Junto con su discípulo Kenneth Williams, desarrolló un laberinto para ratas en el que éstas podían variar las sendas, por lo que el artefacto venía a ser análogo a los tests de inteligencia para los humanos. El laberinto de Hebb-Williams fue utilizadísimo durante todo el siguiente cuarto de siglo. Pero de lo que Hebb se sentía orgulloso era de un artículo teórico en el que sostenía que la inteligencia adulta era influida decisivamente por la experiencia tenida durante la infancia, y basaba esta tesis en los resultados de la investigación que había hecho en el Instituto Neurológico de Montreal. El artículo, ignorado en su momento, constituye hoy un lugar común, habiéndosele aprovechado en programas tan enriquecedores como el de iniciación preescolar. Pero la idea era demasiado avanzada para aquel tiempo: en 1940 la mayoría de los psicólogos definían la inteligencia como una característica innata.

Para conciliar sus estudios sobre la influencia de la infancia con la aparente inocuidad de las lesiones del lóbulo frontal, avanzó la hipótesis según la cual la función principal de esa región no era la de pensar, sino la de facilitar la enorme adquisición de conocimientos que se obtienen durante los primeros años de la vida. Experimentos realizados para determinar los respectivos efectos de las lesiones tempranas y tardías no siempre corroboraban esta idea, que le sirvió, no obstante, de trampolín para lanzarse a nuevas teorizaciones.

En 1942 Lashley pasó a dirigir los Laboratorios Yerkes de Biología de



2. UNA HIPOTETICA ASAMBLEA CELULAR: se parte de fibras paralelas que ponen en conexión la información que, procedente de la retina, se dirige hacia los correspondientes puntos del córtex visual primario, cuyas neuronas se ponen en contacto, a su vez, con la corteza "asociativa". La información convergente excita las células y activa bucles cerrados (*rojo intenso*). Síguense cambios sinápticos que capacitan al circuito para activarse con un estímulo mínimo, segregando una información que representa al cerebro lo que el ojo ha visto.

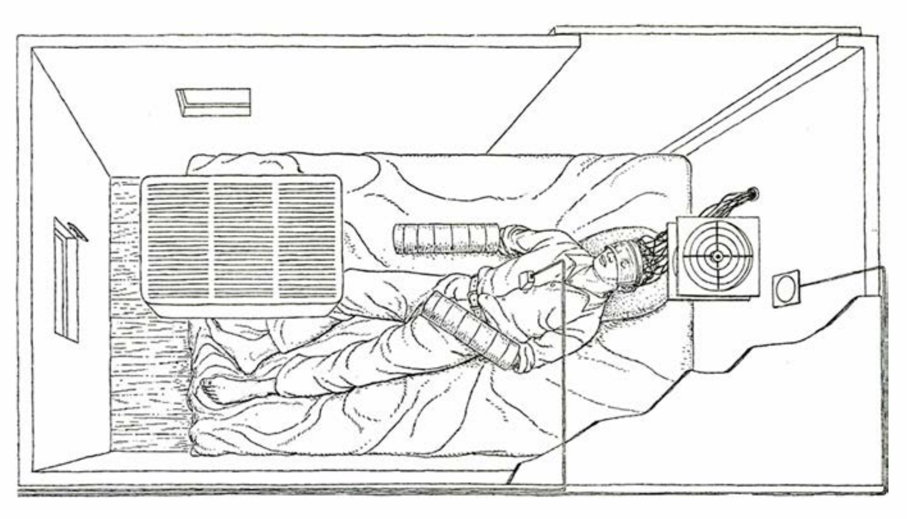
3. LA FATIGA RETINIANA corrobora la teoría de la asamblea de células, al hacer que las imágenes se desvanezcan de un modo peculiar. Con este aparato se puede fijar una imagen sobre los receptores hasta que se esfuma la señal de la misma. Entonces van desapareciendo las líneas, una o dos al mismo tiempo cada vez, hasta que la figura se borra del todo. Hebb sostenía que cada línea estaba representada por un bucle de retroalimentación neuronal. Cuando la señal retiniana cae por debajo del valor umbral, el bucle cesa de oscilar y la línea desaparece.

Primates, en Florida, e invitó a Hebb que le acompañara para estudiar el comportamiento de los chimpancés. Aceptó el ofrecimiento, a pesar de que no le entusiasmaba mucho lo de tener que estudiar a los chimpancés. Lashley se proponía desarrollar tests de aprendizaje y de resolución de problemas para los animales, mientras Hebb habría de ocuparse de su identidad y rasgos emocionales. Después darían comienzo a un programa sobre la incidencia de las lesiones en determinadas variables.

Los chimpancés resultaron más difíciles de adiestrar que lo que Lashley se había imaginado. Las demoras impidieron que se realizara ninguna operación de cerebro. Sin embargo, Hebb quedó fascinado por sus observaciones de los chimpancés y decía haber aprendido más acerca de la personalidad humana en los cinco años que se pasó examinando a aquellos primates que en ningún otro lapso de tiempo posterior a los cinco años primeros de su propia vida. Los primates manifestaban distintas personalidades y un sentido del humor que tendía a lo burlesco. Hebb y los demás miembros del equipo investigador se divertían en grande para sus adentros ante las retorsiones verbales que habían de hacer los visitantes behavioristas cuando intentaban describir las bromas de los animales sin recurrir a un lenguaje "mentalista".

La atenta observación de los chimpancés le enseñó que la experiencia no era el único factor del desarrollo de la personalidad, incluidas fobias y otras manifestaciones patológicas. Comprobó, por ejemplo, que chimpancés jóvenes, nacidos en el laboratorio y que jamás han visto una serpiente, se aterrorizan ante la presencia de la primera. También les asustaban las figuras de cabezas u otras partes aisladas del cuerpo de chimpancés o de los humanos, así como las de sus cuidadores si éstos llevaban atuendos inusuales. Por otra parte, Hebb, tras detenerse en el comportamiento social de marsopas cautivas, sugirió que evidenciaban una inteligencia comparable a la de los primates. Lo que influiría, sin duda, en su ulterior conclusión de que el nivel del juego proporciona un buen índice de inteligencia.

El interés de Lashley por cómo el cerebro elabora las percepciones y las convierte en conocimiento del mundo avivó la curiosidad de Hebb sobre el origen de las ideas. ¿Cómo aprende el cerebro a juntar un triángulo, un coche o un perro con otro triángulo, coche o perro, siendo así que no hay dos triángulos, ni dos coches ni dos perros que produzcan idéntica estimulación en los receptores sensoriales?



4. EXPERIMENTO DE AISLAMIENTO, que extendió el estudio de la privación de estímulos sensoriales más allá del campo de cada asamblea de células. Unos venda-jes-esposas impedían el tacto, una careta-pantalla de plástico alteraba la visión de las figuras y un almohadón en forma de U y relleno de goma-espuma atenuaba los sonidos no encubiertos por el acondicionador de aire que pendía del techo. Los electrodos del EEG registraban las ondas cerebrales del sujeto, quien, mediante un micrófono, podía ir informando de lo que experimentaba. La capacidad de pensar de los voluntarios disminuía, y algunos de ellos hasta empezaban a tener alucinaciones.

El momento decisivo llegó al topar Hebb con la obra de Rafael Lorente de Nó, neurofisiólogo del Instituto Rockefeller de Investigaciones Médicas, quien había descubierto en el cerebro circuitos neurales, o vías de retroalimentación. Hasta entonces, todas las teorías psicológicas daban por descontado que la información seguía una dirección de un solo sentido, algo así como la comida a través del tracto digestivo. Hebb cayó en la cuenta de que los bucles de Lorente de Nó era lo que necesitaba para desarrollar una teoría más sólida de la mente.

El concepto de retroalimentación no era desconocido en teoría del aprendizaje. Aceptábase que la acción del organismo condicionaba la entrada de nueva información, por ejemplo capacitando al animal para recibir un estímulo reforzante. Ahora bien, si procediera así la retroalimentación, a través de una sola vía, operaría lenta e insegura. Pero con millones de sendas de retroalimentación interconectadas sí podrían establecerse modelos internos del entorno que permitirían predecir los efectos de las respuestas sin mover un músculo.

Inducido por su familiaridad con la visión, se concentró en dicho sistema para avanzar sus primeras teorías neurológicas. Sabiendo que la proyección punto por punto, de la retina a la corteza, no se extiende más allá de la corteza visual primaria, supuso que los relés neurales se proyectaban hacia la corteza circundante en direcciones aleatorias, tejiendo la imagen retiniana. Semejante disposición recombinaría las señales procedentes de las distintas partes de la imagen, es decir, podrían converger sobre la misma neurona diana y excitarla. Los impulsos resultantes podrían a continuación retornar a las neuronas instaladas en una zona precedente de la senda, cerrando los bucles de realimentación.

La activación reiterada de cualquier bucle reforzaría ese lazo del siguiente modo: si el axón de una neurona de entrada de información se halla cerca de la neurona diana y la excita, participando persistentemente en la activación de la misma, se produce, en una o en ambas células, un proceso de desarrollo que redobla el rendimiento del estímulo presentado por la neurona de entrada. A las sinapsis que se comportan de acuerdo con este postulado se las denomina "sinapsis de Hebb". Freud y otros habían avanzado algo parecido.

Aunque propuesto con elegancia formal, el postulado de Hebb era, en 1949, pura especulación. Los estudios ulteriores con neuronas individuales confirmarían que, en algunas, cambia la intensidad sináptica a tenor del postulado. Y puede que también acertara en lo relativo al mecanismo del cambio permanente. Aryeh Routtenberg, de la Universidad del Noroeste y antiguo alumno suyo, acaba de señalar que, si se estimulan las neuronas hasta aumentar su intensidad sináptica, se produce una proteína asociada con el desarrollo neuronal.

Hebb supuso que la mayoría de

5. LA INFLUENCIA DE HEBB se propagó a través de sus libros y de sus discípulos. Aquí, en un seminario para doctorandos de los años cincuenta. Los participantes llegarían a ser pronto los adelantados del nuevo campo de la psicofisiología.



BEN DOAN *Universidad de Dalhousie* — HELEN MAHUT *Universidad del Nordeste* — PETER MILNER *Universidad McGill* — JIM OLDS *Caltech* (FALLECIDO)

las sinapsis de la red cortical, débiles en un principio, no se activaban espontáneamente. Para excitarse, requerirían que convergiera el estímulo promovido por varias neuronas. Algunas neuronas de la red reciben información convergente, gracias a lo cual se disparan cuando un estímulo excita cierta serie de neuronas de la corteza sensorial. Algunas de las neuronas activadas establecen conexiones sinápticas entre sí, reforzadas a cada presentación del estímulo. Las conexiones entre las neuronas de la red que se disparan simultáneamente adquieren firmeza suficiente para seguir excitándose unas a otras en ausencia del impulso procedente del estímulo, creando una representación interna del estímulo, la asamblea o conjunción celular.

El concepto de conjunción celular fue la principal contribución de Hebb a la psicología teórica, por no decir que a la filosofía. Reavivó el intento de los psicólogos del siglo XIX de explicar la conducta en términos de asociación de ideas, proyecto que habían desechado los behavioristas arguyendo que las "ideas" eran algo tan irreal como la creencia en duendecillos vagando por el interior de la cabeza. Para los conductistas, las ideas, y por tanto el mentalismo, no tenían cabida en la psicología científica.

Pocos parecieron advertir que los conductistas sustituían las ideas por constructos no menos infundados, a los que daban nombres tan engañosos como "estímulos" y "respuestas"; no se trataba de datos o series de hechos observables, sino de atributos asociados unos con otros dentro de una imaginaria "caja negra", a la que estaba vedado denominar cerebro. Hebb puso fin a este despropósito demostrando que las ideas podían tener una base física tan firme como los movimientos musculares. Podían constar de pautas aprendidas de excitación nerviosa en el cerebro, instada inicialmente por la información sensorial pero que después iría adquiriendo autonomía.

En su forma originaria, el carácter elemental de la teoría neural frenaba su aceptación. En su contra tenía que la asamblea celular no incluía la inhibición, porque la ciencia contemporánea no la había reconocido aún. Sir John C. Eccles seguía insistiendo en negar la existencia de sinapsis inhibidoras. Por otro lado, no se habían descubierto todavía muchas conexiones importantes del neocórtex, y apenas se había insinuado la significación funcional de la pluralidad de neuronas corticales.

Ahora bien, sin factores inhibidores, el aprendizaje reforzaría las conexiones sinápticas hasta que todas las neuronas se excitaran sin cesar, haciendo inútil el sistema. Este efecto se observó en modelos computarizados de la asamblea celular, conceptores de nombre, construidos en los años cincuenta por el equipo de Nathaniel Rochester, de IBM en Poughkeepsie. No parece que Hebb teclease nunca un ordenador con el fin de poner a prueba su idea de que las redes nerviosas aleatorias podrían autoorganizarse para almacenar y devolver información. Pero esas redes nerviosas inspiraron muchos modelos computarizados, desde el perceptrón hasta el procesamiento en paralelo, con aplicaciones incluso en la industria.

Cuando *The Organization of Behavior* salió de tiros, Hebb estaba de nuevo en Montreal, al frente del departamento de psicología de la McGill. Diez años después, cuando renunció a su dirección, el departamento por él formado era uno de los más competentes de toda Norteamérica.

La mayoría de sus investigaciones en la McGill tuvieron que ver con su teoría de la conjunción celular. Los experimentos fisiológicos para respaldar la teoría rebasaban los límites de la metodología contemporánea. (Aún los rebasan.) Por ello sometía a prueba las predicciones comportamentales de la teoría. Trató, por ejemplo, de reforzar sus postulados sobre la influencia de la crianza en la inteligencia adulta. La mayoría de los resultados vinieron a corroborar su idea de que los animales criados en un ambiente enriquecido o más complejo tendrían luego en su vida muchas ventajas sobre los animales enjaulados.

Hubo una embarazosa excepción. Dividió una camada de terriers escoceses de pura raza en sendas mitades: unos cachorrillos se criaron con mimo en hogares de miembros del equipo investigador y la otra mitad en jaulas del laboratorio. Hebb no fue afortunado en la elección de su cachorro que, congénitamente incapaz de orientarse, se extraviaba en cuanto perdía de vista la casa y hubo que rescatarlo de la perrera en varias ocasiones. El can obtuvo una de las puntuaciones más bajas de todas cuando, siendo ya adulto, se le sometió a un test de laberinto.

En una serie de experimentos afines investigó el efecto de la merma severa de información sensorial sobre la conducta de los adultos, incluidos humanos voluntarios. Algunos alum-



G. ROLFE MORRISON *Universidad McMaster* — NO IDENTIFICADO — SETH SHARPLESS *Universidad de Colorado, Boulder* — DONALD O. HEBB *Universidad McGill* (FALLECIDO)

nos se sometieron a duras privaciones de estímulos sensoriales durante el tiempo que pudieran aguantarlas (ninguna se prolongó una semana): empezaba a disminuirles la capacidad de pensar y hasta se produjo algún caso de alucinación. Eran los días de la guerra de Corea y muchos recurrieron a esos experimentos de aislacionismo para comprender y combatir las técnicas de "lavado de cerebro" empleadas por los chinos.

Hebb prosiguió con su vieja idea de que una lesión tenía que ser más perjudicial en un cerebro inmaduro que en el de un adulto. Pero los resultados se arruinaban por varios factores, uno de ellos la capacidad autoorganizativa del cerebro en desarrollo. Piénsese que si un bebé sufre una lesión en una zona del hemisferio cerebral izquierdo, importante en el adulto para el habla, el hemisferio derecho del niño se encarga de esta función y no se resiente en exceso su capacidad locutiva; esa misma lesión en el adulto causa la pérdida del habla.

Encontrándose con tales problemas al estudiar la cognición, imaginó que la mejor prueba en favor de la asamblea celular era la que se deducía de sus experiencias sobre el desvanecimiento de las imágenes retinianas. Se proyectan figuras sencillas hacia el ojo mediante un sistema de lentes unidas a unas lentillas de contacto, asegurándose de que la imagen caiga siempre sobre el mismo lugar. A medida que las células receptoras se van fatigando, la imagen se desvanece hasta desaparecer, pero no toda de una vez. Suelen borrarse de repente líneas enteras, una o dos al mismo tiempo, hasta que al fin se ha ido toda la imagen. El fenómeno se debe, decía, a que cada línea está representada por la actividad neuronal que recorre un circuito cerrado. Esa actividad, una vez desencadenada, persiste después incluso de que la información procedente de la retina ha decaído hasta un valor ínfimo, en virtud de la retroalimentación que se produce en torno al lazo. Pero, al llegar a cierto valor crítico, la reverberación cesa de pronto y desaparece la línea. Estos experimentos no proporcionan pruebas definitivas a favor de la asamblea celular tal como Hebb la concebía; pero, aunque la versión de éste resultó incorrecta, no debilitó la validez de su hipótesis: hay actividad neural que sigue simbolizando un objeto, aun después de que el objeto real haya dejado de estimular los órganos sensoriales.

Si *The Organization of Behavior* se hubiera limitado a criticar las hipótesis dominantes y elaborar su teoría de la asamblea celular, el libro habría pasado inadvertido. El atractivo reside en su segunda mitad, donde se ocupa de la emoción, la motivación, la enfermedad mental y la inteligencia, examinándolas a la luz de su teoría. Expone a propósito de la salud mental: "Seguimos necesitando un Ayax que se yerga firme desafiando al rayo y que, cuando cualquier autoridad haga saber al público que a los niños les es malo creer en Santa Claus, que los tebeos conducen a la degeneración psíquica o que el asma se debe a una oculta enfermedad mental, grite ¿Qué prueba hay de ello?"

Maestro en la organización y dirección, daba él mismo el curso introductorio, de notable éxito; en algún momento llegó a contar con 1500 estudiantes. Muchos profesores de psicología descubrieron su vocación en aquellas clases. Sus lecciones eran únicas; ningún manual incluía, ni de lejos, las materias e ideas de que él se ocupaba, por lo que escribió su propio texto. La primera edición de *A Textbook of Psychology* apareció en 1958. A diferencia de los manuales al uso, el suyo aportaba más ideas que ilustraciones gráficas.

Impartía también un seminario para graduados por el que a lo largo de 30 años fueron pasando todos los estudiantes de posgrado de la McGill. Fue famoso no sólo por sus estimulantes discusiones, sino también por el siempre presente cronómetro de Hebb y por las tiras de papel en que iba anotando las pronunciaciones incorrectas y otros defectos de presentación. Se había propuesto que ningún alumno de la McGill rebasara nunca el tiempo que se le asignase para hablar en una reunión, y en general lo consiguió. La Universidad McGill honró a Hebb en 1970 nombrándole canciller; él fue el único miembro de una facultad al que se eligiera alguna vez para ese puesto.

En 1977 se retiró a su Nueva Escocia natal, donde terminó su último libro, *Essay on Mind*. Nombrado profesor emérito de psicología en su *alma mater*, Dalhousie, participó allí regularmente en coloquios hasta morir, a los 81 años de edad, en 1985.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORGANIZATION OF BEHAVIOR: A NEUROPSYCHOLOGICAL THEORY. D. O. Hebb. John Wiley, 1949.

ESSAY ON MIND. D. O. Hebb. Lawrence Erlbaum Associates, 1980.

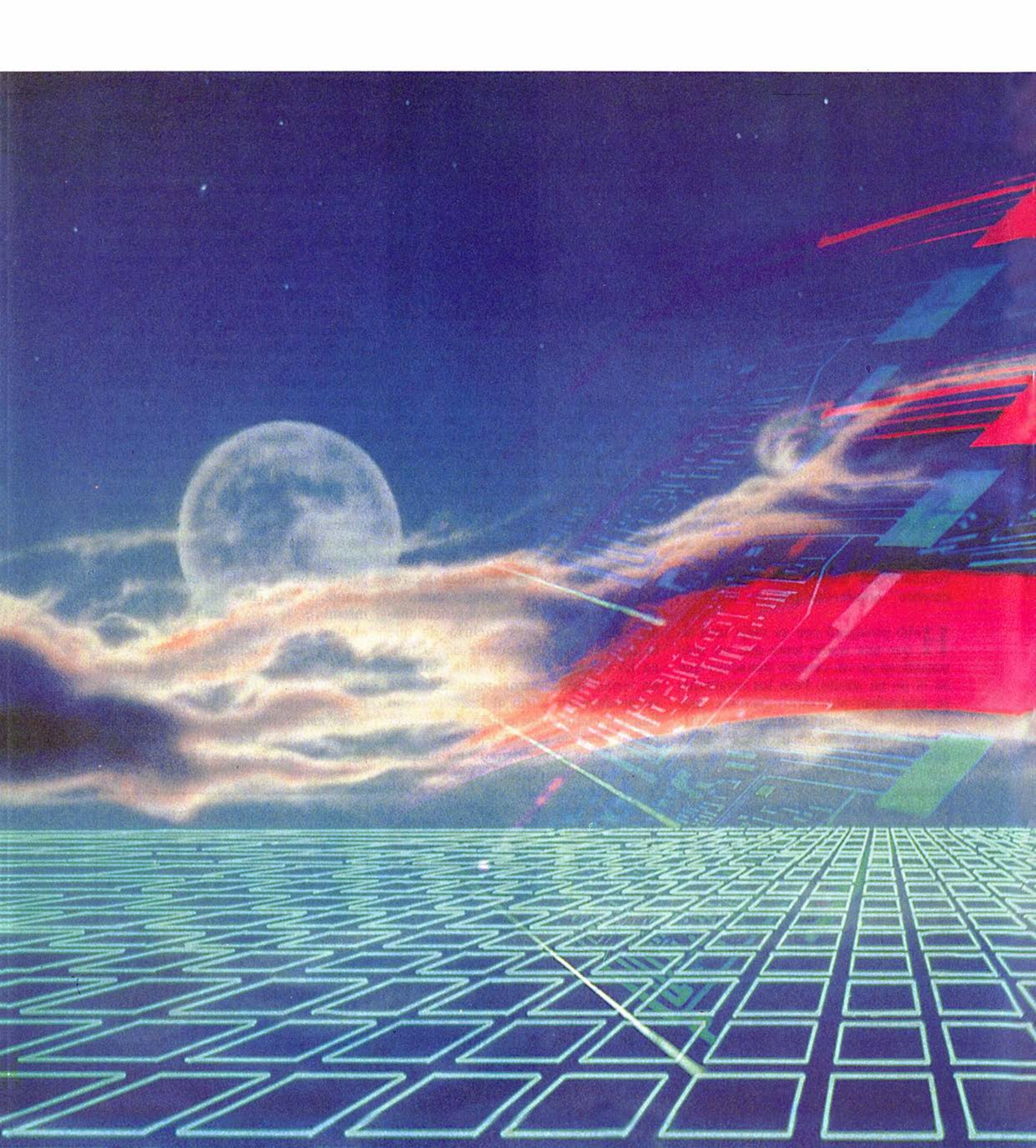
PARALLEL LEARNING IN BRAINS AND MACHINES. G. Ferry en *New Scientist*, vol. 109, n.º 1499, págs. 36-38; 1986.

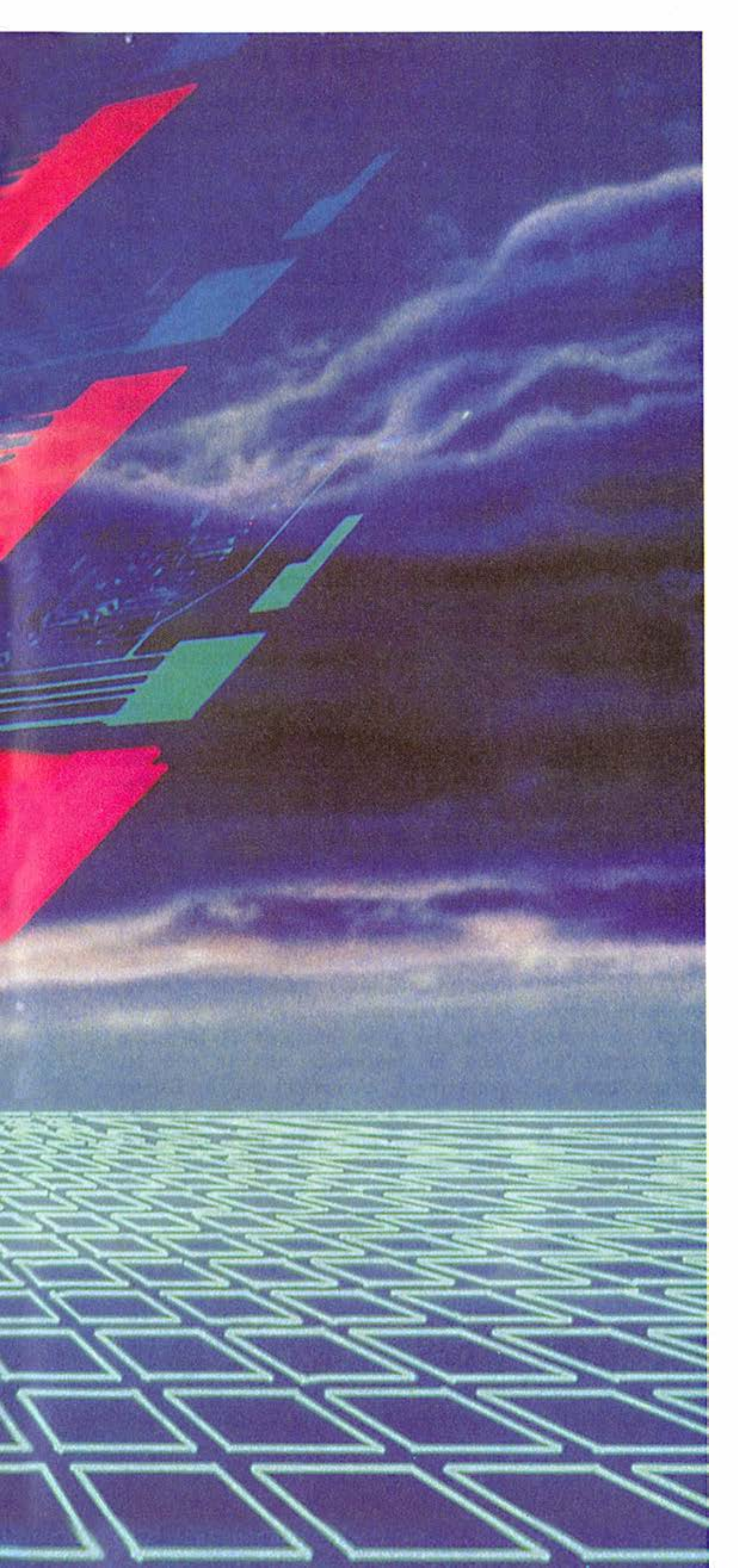
TEXTBOOK OF PSYCHOLOGY. Cuarta edición. D. O. Hebb. Lawrence Erlbaum Associates, 1987.

MENTE Y CEREBRO. Número extraordinario de *Investigación y Ciencia*, novbre. de 1992.

EL PROYECTO MAIA

Luigi Stringa

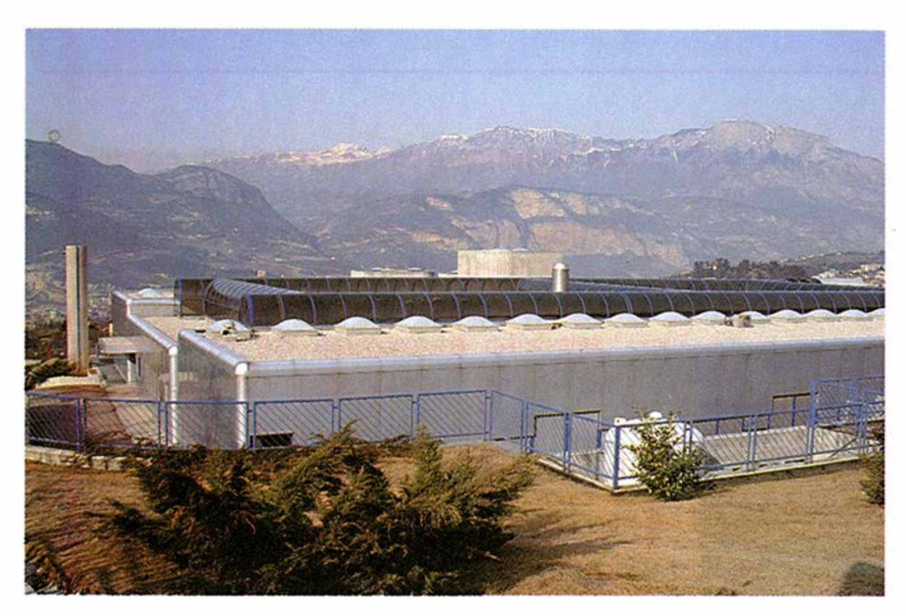




La inteligencia entendida como sistema integrado de comportamientos, sentido común y capacidad de aprender directamente de la experiencia: el "Modelo avanzado de inteligencia artificial" del IRST de Trento

Por no ser ni sustancia ni accidente, la peste no podía existir. Sin embargo, don Hernando murió de peste. También hubo quien concibió y realizó con éxito preciosas máquinas de calor cuando ni siquiera se había inventado la teoría termodinámica. La inteligencia artificial (IA) no es, que se sepa, la peste, aunque algunas de sus características parezcan apestadas. Tampoco se apoya en una sobria teoría unitaria convincente, en el caso de que exista alguna y su búsqueda no sea, como dice Douglas B. Lenat, mero alarde ante la física. No lleva, quizá, la semilla del contagio como la peste, y algunos le han colgado ya el sambenito de los infectados, antes incluso de salir a la luz (lo que no sucedió con la muerte negra). No ha madurado todavía y se ha formado ya un enjambre de "pensadores" presto a garantizar qué metas no alcanzará jamás. Alguno ha definido la "inteligencia" precisamente como aquello que las máquinas no podrán realizar nunca ("teorema de Tesler"). Y ni siquiera han faltado, en su propia comunidad de adeptos, las peleas furibundas y pestíferas. Recuérdese el artículo de Paul Wallich ("Bebés de silicio", aparecido en *Investigación y Ciencia*, febrero de 1992.) para convencerse más allá de cualquier duda razonable.

Pero el que la inteligencia artificial sea una disciplina manoseada y cuestionada no nos debiera sorprender tanto: la natural no lo es menos. La definición de esta última fue siempre una auténtica manzana de la discordia. El propio hombre de la calle, lejos de plantearse el problema de la definición, reconoce, empero, si la hay. (Cuéntese el número de veces en que llama cretino a su vecino y compárese esa cifra con el número de veces en que lo supone inteligente.) Me inclino por los que construyeron las máquinas de calor; obviamente, si tuviera también la teoría termodinámica, miel sobre hojuelas. Aun sin teoría, me parece siempre



1. INSTITUTO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA (IRST), situado en una colina próxima a Trento. Consta de una plantilla integrada por 180 unidades, más de un centenar de las cuales corresponde a investigadores. El IRST ha adoptado un enfoque integrado en el que convergen los principales campos de investigación del sector: visión, reconocimiento y síntesis del habla, elaboración del lenguaje natural, razonamiento mecánico y planificación, factores humanos y representación de la conciencia.

mejor trastear con alguna "máquina útil". ¿Qué decir de la definición de inteligencia artificial? En última instancia podría recurrir a un seco "dígame usted qué es la inteligencia porque, para explicar el calificativo *artificial*, ya me valgo yo". Si por inteligencia designamos, y me abono a esa noción, un conjunto de comportamientos, la artificial será la disciplina que se ocupa del desarrollo de máquinas capaces de mostrar ese conjunto de comportamientos, o una parte notable de ellos por lo menos.

Con la inteligencia artificial (IA) abordamos un tema de investigación fascinante y, en varios aspectos, único. Por primera vez en la historia de la ciencia coinciden el sujeto, el instrumento y el objeto de inquisición: el pensamiento (la inteligencia) se analiza a sí mismo para producir pensamiento (inteligencia). El instrumento, también la inteligencia (del investigador). La naturaleza del pensamiento, junto con el origen de la vida y el origen de la estructura del universo forman la tríada mayor de los retos que tiene planteados la ciencia moderna.

El nacimiento de la IA

Vayamos a la historia. Podemos datar su fecha de nacimiento el año 1950, cuando apareció el ensayo *Computing Machinery and Intelligence*, de Alan M. Turing; o también 1956, año en que Marvin Minsky y John McCarthy acuñaron la denominación "oficial" *Artificial Intelligence* con ocasión de una reunión histórica en el Darthmouth College. La inteligencia artificial ha superado, en cualquier caso, la treintena. Y, sin embargo, la pregunta inicial de si pueden pensar las máquinas aguarda todavía una respuesta satisfactoria. En sus inicios, "inteligencia" era sobre todo razón, demostración de teoremas, habilidad en el ajedrez. Los investigadores de la inteligencia artificial estaban convencidos de que la construcción de máquinas lógicas portentosas (el espíritu del *Ars magna* de Ramon Llull y del *calculus ratiocinator* de Gottfried Wilhelm Leibniz) les habría conducido directamente al núcleo de la inteligencia.

Hoy sabemos que las cosas son muy distintas. Lo que debería haber constituido el nivel más alto (el rigor de la lógica, las "leyes del pensamiento" de George Boole) se ha conseguido con cierta rapidez, al menos dentro de unos límites. Paradójicamente, los sistemas desarrollados no parecen capaces de facilitar soluciones satisfactorias para los problemas que el sentido común reputaría más sencillos. Así, por ejemplo, disponemos de programas que juegan al ajedrez en un nivel altísimo; pero crear un sistema dotado del poder de visión del insecto constituye un objetivo lejano.

En ese marco se inscribe el nacimiento del IRST y del proyecto MAIA. Treinta y cinco años después de la aparición de *Computing Machinery and Intelligence*, estaba convencido de que todo se basaba en una redefinición del problema. En el mes de junio de 1984, el senador Bruno Kessler me pidió parecer sobre un ambicioso proyecto suyo: construir en Trento un centro de investigación de vanguardia y realista, capaz de generar conocimiento básico y aplicado. Transcurrido apenas un año, estaba en Trento para perfilar el plan quinquenal del desarrollo de un sistema integrado de IA.

Génesis de MAIA

Volviendo a la definición práctico-operativa del test de Turing, para ser considerado "inteligente" un sistema debía comportarse como una persona. Pero en la interpretación habitual, esta definición no mencionaba uno de los aspectos principales de la conducta inteligente, a saber, el aprendizaje o capacidad de aprender. La incapacidad manifiesta de los sistemas de desenvolverse por sí mismos, de aprender sin requerir una minuciosa programación, constituía una barrera que la IA tenía que superar para alcanzar las metas fijadas.

No bastaba, pues, construir un sistema experto habilísimo en el juego de ajedrez, ni un sistema preparado para efectuar diagnósticos médicos de fina precisión: para calificarlo de inteligente, el sistema debía ser capaz de autoperfeccionamiento. Debía poder interaccionar directamente con el entorno físico y aprender de la experiencia acumulada. El sistema mostraría un comportamiento inteligente cuando evidenciara "curiosidad" de explorar el mundo para descubrir y aprender hechos nuevos.

Entre las contribuciones decisivas de los primeros treinta años destaca la idea según la cual IA era una "disciplina experimental". Una aproximación correcta al problema del aprendizaje requería el desarrollo de una plataforma experimental idónea, de un sistema dotado de capacidad sensorial y motora que le facultase para la interacción directa con las personas y el mundo físico. Estaba claro que una plataforma de ese tipo debía estar preparada para gestionar diversas fuentes de información y conocimiento, En resmen, había de ser una plataforma integrada.

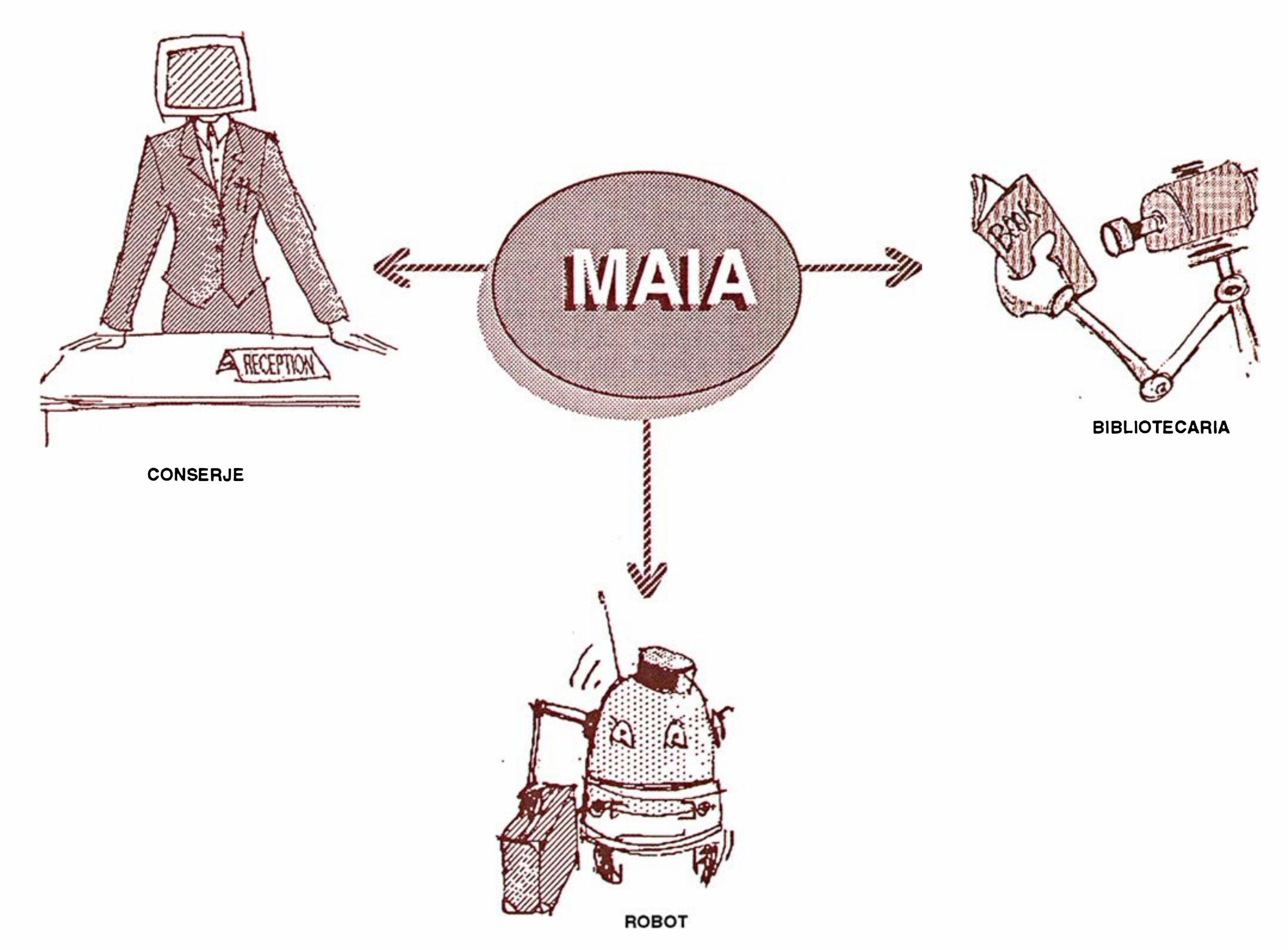
Los primeros años de vida de la IA se caracterizaron, en cambio, por una excesiva fragmentación de la investigación. Tres siglos antes de Turing, Descartes había declarado que la limitación de la máquina con respecto al hombre residía en la naturaleza especializada de aquélla:

"Cuando las máquinas realizaran tareas similares a las del ser humano —e incluso mejores— cometerían errores en otras operaciones, prueba de que su acción no viene dictada por la inteligencia, si no que procede del puro engranaje de las partes componentes". Esta postura reflejaba una idea trasnochada de lo que sea una máquina. Los sistemas expertos desarrollados de la IA diferían de los autómatas del siglo XVII. Ninguna ofrecía un comportamiento inteligente. Como mucho, podríamos decir que se había logrado una amplia diversidad de sistemas refinados, capaces de realizar con bastante acierto las tareas asignadas, pero sólo ésas. (Debido en buena parte a las industrias informáticas, lejos de combatirse la tesis cartesiana se propagó una concepción afín mediante el eslogan: "las máquinas hacen sólo lo que se les pide".)

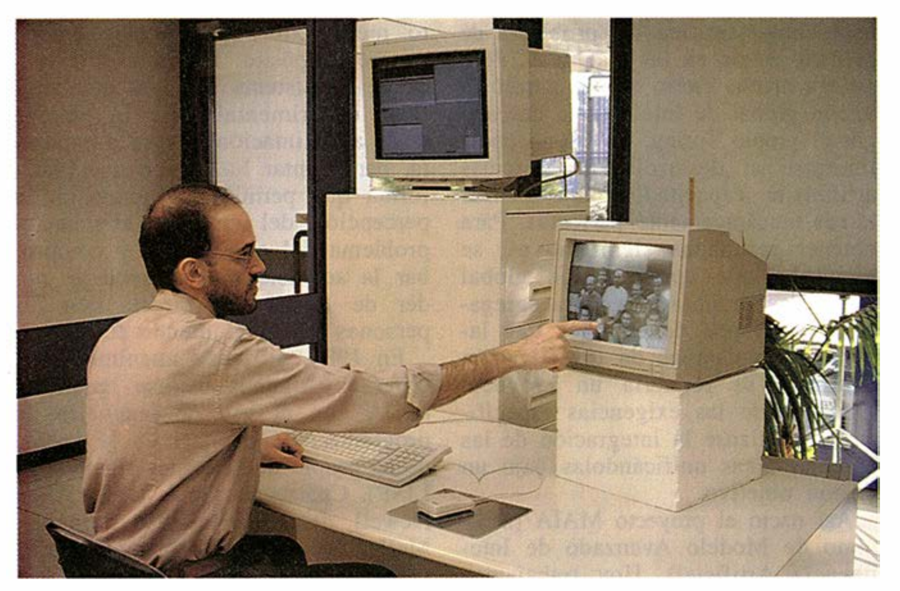
En resumen, Turing había establecido un salto cualitativo en el planteamiento científico del problema de la inteligencia en las máquinas. Pero no era menos cierto que se perdió la visión global de inteligencia deseada por el propio Turing. La IA no podía limitarse al desarrollo de sistemas artificiales capacitados para realizar tareas mecánicamente perfectas. Para obtener resultados significativos, se precisaba una aproximación global que no se limitara a la mera agregación de grupos de expertos que laborasen en campos de investigación distintos: se requería un proyecto que, allende las exigencias específicas, garantizase la integración de las diversas áreas unificándolas bajo un mismo objetivo.

Así nació el proyecto MAIA (acrónimo de Modelo Avanzado de Inteligencia Artificial). Hoy trabajamos más de un centenar de investigadores en distintos campos —visión, reconocimiento y síntesis del habla, lenguaje natural, recursos humanos, representación del conocimiento, razonamiento mecánico—, cementados en un mismo propósito: la realización física de un sistema sobre el que verificar experimentalmente la validez de la aproximación integrada expuesta, para contar luego con una plataforma que permita, partiendo de la percepción del entorno, abordar el problema del aprendizaje y comprobar la adquisición autónoma de poder de interacción directa con las personas y con el mundo físico.

En 1986, no había unanimidad de criterios. Algunos incluso igualaban la IA con el uso de lenguajes de programación, sin caer en la cuenta de su propio declive (por ejemplo, el LISP). Cuatro años más tarde, Allen Newell, de la Universidad Carnegie-Mellon, lanzaba un llamamiento apelando a la cooperación para crear "sistemas inteligentes integrados", construcción que no era otra que el principio unificador del plan: "el enfoque fundamental puede sintetizarse con el adjetivo sistémico".



2. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE MAIA: se trata de un sistema integrado que consta de tres componentes principales, a saber, un conserje automático, una bibliotecaria y una familia de robots. El conserje interactúa con los visitantes en lenguaje natural atendiendo a sus peticiones sobre los objetivos y la estructura del IRST); la bibliotecaria electrónica gestiona los préstamos y devoluciones reconociendo a las personas y los libros.) Por su parte, los robots móviles desempeñan tareas dispares; están capacitados para la "navegación", movimiento autónomo por los pasillos del IRST.



3. EL CONSERJE DE MAIA, situado en el vestíbulo del instituto, es una terminal que dialoga con los visitantes en un italiano bastante flexible, aportando información sobre el IRST. La interacción es multimedial (teclado, ratón, imágenes y gráficos). En la fotografía, el usuario señala la persona acerca de la cual requiere información. Se prevé la incorporación de un sistema de reconocimiento y síntesis del habla que permitirá un coloquio genuino.

Los dos años iniciales del plan quinquenal (1986-87) se dedicaron a la creación de las fuentes. El desarrollo de los primeros módulos de MAIA comenzó a principios de 1988. Pronto surgió el problema de la definición de las funciones que el sistema tenía que desarrollar: las "especificaciones funcionales". Se tenía que individualizar las funciones que fueran aptas para comprobar la validez de las hipótesis relativas al comportamiento. El criterio de largo alcance más exigente era el de deslindar funciones, cuya realización facilitara el desarrollo de técnicas y subsistemas aplicables en la industria, para reducir al máximo el hiato entre investigación y aplicación.

La plataforma experimental de MAIA está concebida y articulada a modo de sistema integrado constituido por diversas mentes y algunos brazos. Las mentes se basan en una serie de programas distribuidos en una red de ordenadores que interaccionan en cooperación regulando el desarrollo de las funciones de los tres brazos principales de MAIA: el "conserje" del instituto, la "bibliotecaria electrónica" y una familia de robots móviles que poseen asignadas diversas tareas y están preparados para desplazarse con autonomía.

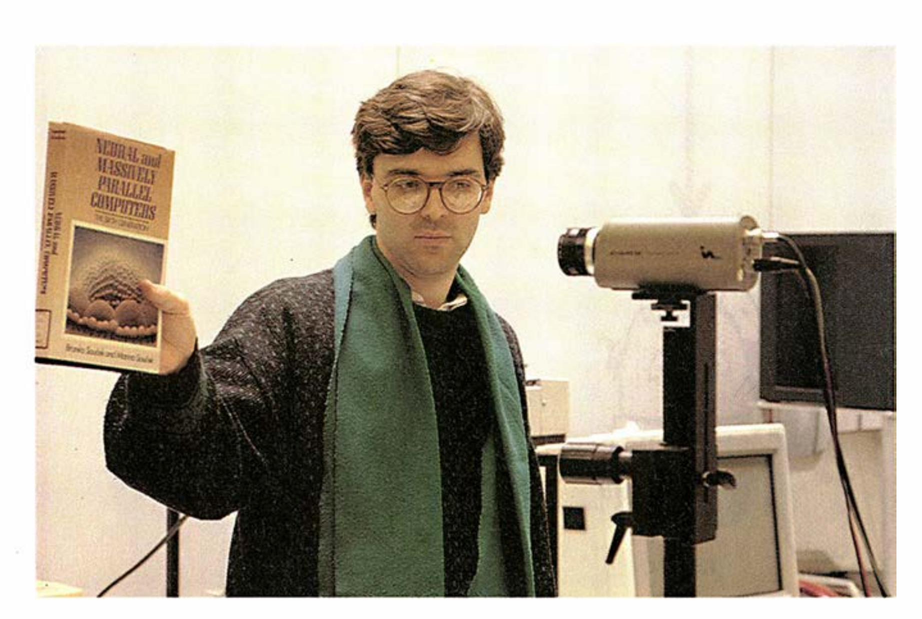
La metáfora del "conserje"

La metáfora del "conserje" es apropiada para una descripción abreviada de buena parte de las funciones principales a desarrollar por el sistema MAIA. Un conserje espabilado sabe responder a cualquier pregunta que se le formule sobre la organización, la tarea y responsabilidades de los sujetos integrantes. Es un banco de pruebas óptimo para nuestra idea de la IA. La interacción gradual con personas conocidas y desconocidas, mediante el empleo integrado de fuentes distintas de información, es la característica que define al conserje.

El "conserje" está instalado en la entrada del instituto: es una terminal. Además de monitor, teclado y ratón, consta de una cámara de vídeo, un micrófono y un altavoz para ver —y reconocer— al interlocutor; dialoga con éste de viva voz o mediante el teclado. El monitor, por su parte, presenta imágenes en respuesta a las preguntas del usuario. El conserje interacciona directamente con los otros brazos de MAIA y dispone de su propio servicio doméstico, que ejecuta perfectamente las subtareas asignadas.

La "bibliotecaria electrónica"

Ubicado en la biblioteca del instituto, este brazo consiste en una terminal cuya composición no varía apenas de la del "conserje": monitor, teclado, ratón, cámara de vídeo, micrófono y altavoz. Nos situamos ante la vídeocámara mostrando la cara, como si estuviéramos ante un interfono dotado de vídeo. La "bibliotecaria", advertida, nos pregunta qué deseamos y nos identifica, reconoce nuestra cara y nuestra voz, autorizándonos a "entrar en la biblioteca". Basta presentar el libro que venimos a devolver o queremos llevarnos prestado, de suerte que la cámara de vídeo perciba la portada. El sistema lo reconoce y efectúa automáticamente el préstamo, o la devolución, registrándolo a vuestro nombre. Si el libro no es reconocido, la bibliotecaria electrónica tendrá que leer título, autor, signatura y demás. La de aportar sugerencias bibliográficas ba-



4. LA BIBLIOTECARIA ELECTRONICA DE MAIA. Ante la exposición del libro por parte del usuario, el sistema procede al registro automático de la transacción, préstamo o devolución. La bibliotecaria reconoce las imágenes de la portada del libro y de la cara del usuario.

sadas en la deducción y la experiencia es una de las prestaciones que ofrece el sistema: una amplia comprobación, de nuevo, de la aproximación del IRST a la inteligencia artificial. Piénsese en el mercado de sistemas de identificación personal.

Los robots móviles

El tercer brazo de MAIA consta de un robot principal y varios robots secundarios para tareas particulares (vigilancia, exploración, experimentación de nuevas técnicas de navegación). Además del conserje, el usuario puede encomendarle determinadas misiones a viva voz, hablándole directamente al robot. Se sospechan fácilmente sus campos de aplicación.

Hoy mismo, una parte de la investigación desarrollada en el instituto encuentra aplicación en el proyecto EUREKA-FIRST. ("First" abrevia la expresión inglesa correspondiente a robot de interacción inmediata para tareas auxiliares.) El IRST desempeña un papel principal en ese proyecto de la Comunidad Europea, que se propone el desarrollo de un sistema inteligente mediante el aprendizaje en entornos favorables. El sistema se compondrá de una parte fija y de otra móvil (útil para el transporte de medicinas, por ejemplo); se caracterizará por un elevado nivel de interacción con usuarios inexpertos. Un proyecto, como se ve, que presenta muchos puntos de afinidad con MAIA.

La visión

Los tres componentes del sistema emplean la visión para ejercer sus funciones: los robots móviles para navegar (andar) por el instituto de forma autónoma; el conserje y la bibliotecaria electrónica para reconocer a las personas "mirándolas" a través de una videocámara y para reconocer las portadas de los libros y leer el título. Esta elección subraya la importancia que atribuimos a la visión, a la hora de establecer un comportamiento inteligente: el ver permite recibir una ingente cantidad de información sobre el mundo exterior, aportando los elementos necesarios para interactuar correctamente con él. Por ejemplo, un robot móvil lo mismo puede encontrarse en su camino investigadores del IRST que otros robots del sistema MAIA. En particular, en el caso de los robots móviles, la visión cumple una misión fundamental al aportar al subsistema de navegación los datos necesarios para orientarse, esquivar los obstáculos y definir la propia situación reconociendo puntos singulares (puertas, ventanas, etcétera). Este subsistema gobierna el movimiento de los robots utilizando datos de otros sensores, como los medidores de distancia por ultrasonidos y los odómetros que, a partir del número de rotaciones de las ruedas, ofrece información sobre el camino recorrido. Esos datos, integrados en un diagrama esquemático del instituto, permiten al robot saber dónde se encuentra y planificar el recorrido para alcanzar el destino asignado.



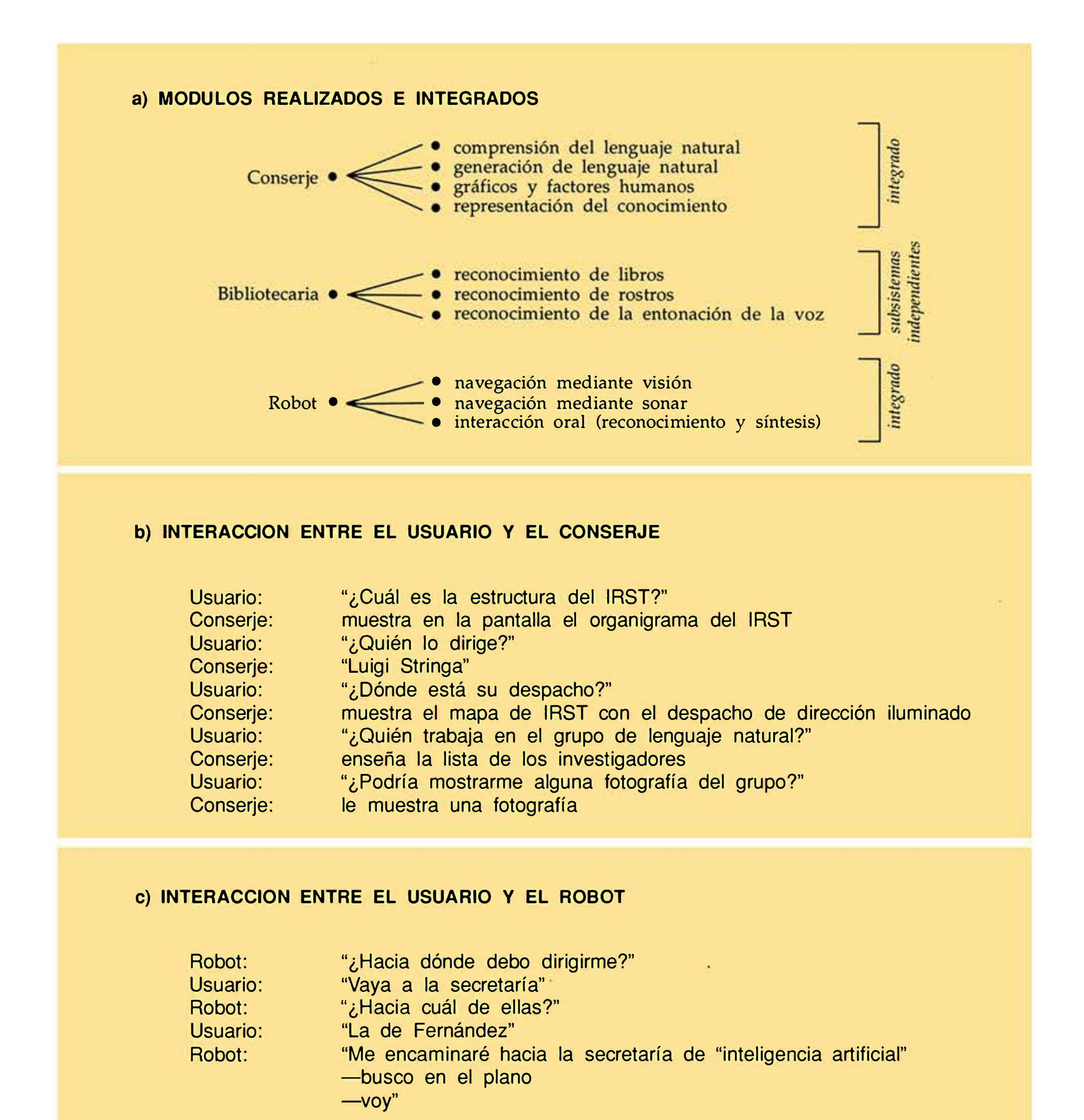
5. ROBOTS MOVILES DE MAIA. Son dos. Uno principal (*izquierda*), dotado de cámara de vídeo y sensores de ultrasonidos, está capacitado para comunicarse verbalmente con las personas, a través de micrófono y altavoz. El segundo, de menor talla y complementario de aquél (*derecha*), sirve para determinadas misiones, verbigracia, la vigilancia del instituto y experimentación con nuevas técnicas.

Desde el punto de vista de su arquitectura, el subsistema de navegación se fundamenta en dos prototipos de conducta: un componente *espinal*, que se basa en los "reflejos", y otro *cortical*, que se funda en la planificación. Los reflejos provocan reacciones inmediatas ante determinados estímulos sin precisar "razonamiento" alguno: si el robot está a punto de precipitarse contra un obstáculo, los sensores de ultrasonido lo avisan a los servomecanismos que controlan los motores, y éstos se paran. Más en general, los reflejos operan a modo de bucles o anillos de realimentación: sensores —actuadores— sensores; por ejemplo, el sistema de visión puede extraer de la imagen las aristas y evidenciar los puntos de confluencia del muro y el suelo. Un reflejo mantiene al robot en el centro del pasillo.

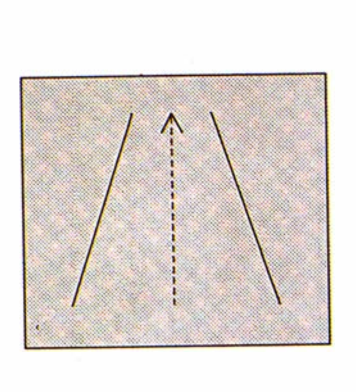
Situación de desarrollo en que se encuentra el proyecto MAIA

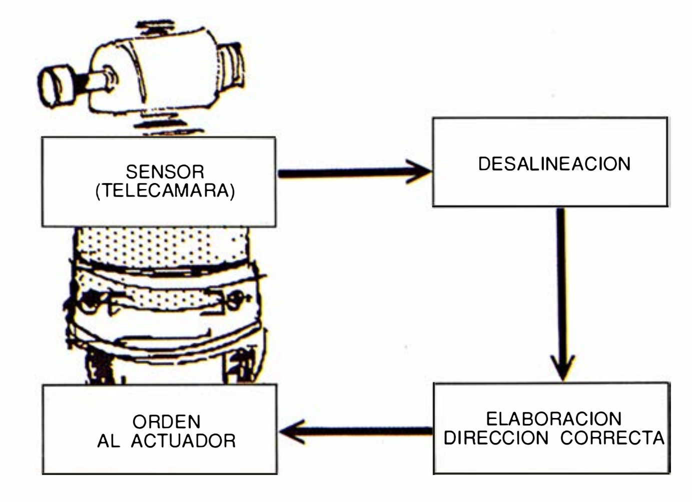
La mayoría de los módulos de base para la visión, el reconocimiento del habla y la elaboración del lenguaje natural —módulos que han permitido una primera versión, bastante completa, de MAIA, presentada en febrero del año pasado— se desarrolló entre 1988 y 1990. La experimentación ha mostrado un primer ejemplo de comportamiento integrado de conserje y robot. Le seguirán ulteriores avances en un futuro próximo; entre otros la integración en el conserje de un subsistema del reconocimiento—síntesis del habla, para permitir la interacción oral con el usuario, amén del empleo del robot principal para transportar objetos (libros). Además, la base de datos relativa a los libros conocidos por la bibliotecaria se ampliará.

Los desarrollos logrados han reportado subsistemas y técnicas comercializadas y comercializables (reconocimiento de caracteres, identificación de las personas y sistemas de dictado), máquinas de obvia utilidad en su modesto alcance; se refinarán con la introducción de nuevos diseños, teóricos y prácticos.



6. LA PRIMERA VERSION de la plataforma experimental de MAIA se presentó en febrero de 1992. En *a* se esquematizan los principales módulos ya realizados, alguno integrado incluso. En *b* y *c*, se ilustran, respectivamente, la capacidad de interacción entre el usuario y el conserje (mediante teclado) y la interacción entre el usuario y el robot (a viva voz); ambas capacidades han quedado corroboradas por el prototipo.





7. EL SISTEMA DE NAVEGACION del robot principal de MAIA emplea un conjunto de reflejos autónomos, cada uno de los cuales se sintetiza como un sistema de control sensor-actuador-sensor. Así, gracias al reflejo autónomo relativo al trayecto ("no pierda la baldosa central"), aquí esquematizado, el robot procede siempre por la zona central del pasillo.

El componente cortical se ocupa, por su parte, de la planificación de las acciones. Controla los reflejos y tiene acceso a un mapa del instituto. Gracias a lo cual, traduce solicitudes hechas en lenguaje natural en comandos comprensibles para el subsistema de navegación. Las coordenadas de los despachos se infieren del propio mapa. Hay que planificar las trayectorias para llegar a ellos. Basta, pues, con traducir la trayectoria en cuestión en una secuencia de órdenes del estilo de "avanza por el centro del pasillo diez metros, gira a la derecha, avanza otros cinco metros, gira a la izquierda". Los reflejos se encargarán de gobernar la ejecución evitando los obstáculos. El componente cortical manejará informaciones más complejas, elaboradas por el sistema de visión, a fin de identificar la posición de reconocimiento de puntos singulares ("hitos"), prever obstáculos lejanos, comprobar la propia orientación, etcétera.

En resumen, el componente espinal tiene una función más táctica e inmediata, en tanto que el cortical la posee estratégica y de más alto nivel. La distinción viene dictada sobre todo por razones de orden práctico: los reflejos operan en la periferia, con rutinas elementales, y su soporte físico está dedicado al control de la plataforma móvil. Ello simplifica los problemas de gestión, descargando al sistema de elaboración central y aumentando la fiabilidad.

Tenemos ahí un ejemplo cuya analogía con los sistemas biológicos es evidente. También para el reconocimiento de las personas y los objetos (libros) hay, al menos, en idea, una arquitectura análoga. Las cámaras de vídeo del conserje y de la bibliotecaria electrónica siguen "fisgando" mediante la comparación de imágenes sucesivas: si son idénticas quiere decir que hablamos de una escena estática, que no ocurre nada, que no hay objeto ni persona nueva que reconocer. Una operación periférica simple, pensemos en extraer de cada imagen la precedente, resuelve el problema: si el resultado es cero para todos los elementos de imagen (píxeles), no hay nada que reconocer. En cuanto el número de píxeles varía de forma constante, hemos de concentrar la atención en la parte de imagen que varía. El enfoque es sencillo y eficaz; permite resolver, en la mayoría de los casos de interés práctico, uno de los principales problemas de la visión, a saber, la segmentación de la imagen de un cuadro extrayendo sólo lo que nos importa.

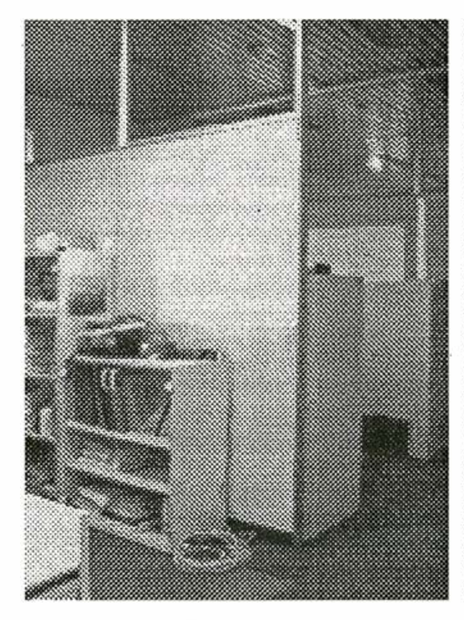
También aquí la analogía con los ejemplos biológicos es directa. Algunos animales ven sólo objetos en movimiento; en el sistema visual del hombre existen, asimismo, neuronas, las llamadas células complejas de la corteza visual primaria que responden sustancialmente a estímulos provenientes de objetos en movimiento. La explicación podría ser sencilla: si todo está quieto, no hay peligro. Ningún problema para la supervivencia, ni como presa ni como depredador. Ahora bien, parece obvio que, si no moviéramos los ojos, no podríamos ver la escena estática: una imagen asentada durante más de un segundo en una zona de la retina se desvanece, deja de percibirse. Cuando queremos fijar una escena estática no tenemos los ojos absolutamente quietos, sino que realizamos sutiles movimientos sacádicos.

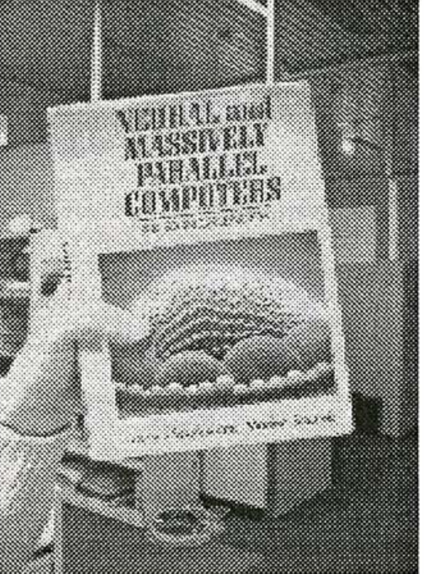
En el reconocimiento de un rostro procedemos así: extraída del fondo la cara y determinada la posición de las pupilas, la imagen se normaliza y se orienta para reducirla a dimensiones estándar (las mismas de las imágenes memorizadas en la fase de aprendizaje), aumentándola si es muy pequeña y reduciéndola si excesivamente grande. Se busca entonces la imagen "más parecida" entre las conocidas, midiendo la correlación. O bien se extraen determinadas características. Los resultados obtenidos son esperanzadores: sobre una muestra de 250 imágenes faciales pertenecientes a 55 personas, el primer enfoque reconoce el cien por cien, con un tiempo de elaboración inferior a 0,2 segundos por rostro; el segundo enfoque reconoce más del 90 por ciento en un tiempo de elaboración similar.

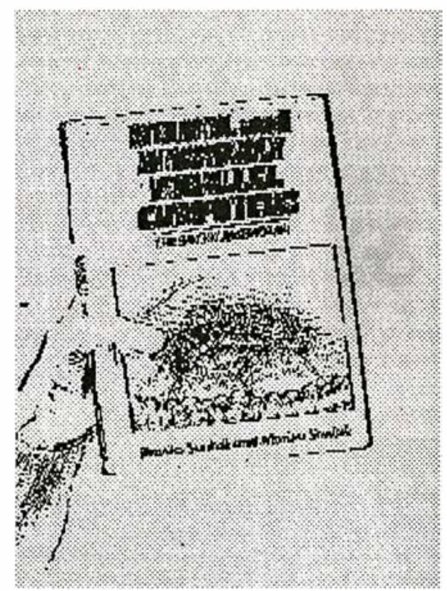
Asimismo, la bibliotecaria electrónica reconoce los libros gracias a dos procesos alternativos y complementarios. El libro se aísla del fondo según el método explicado: cuando lo acercamos a la cámara de vídeo, la escena varía y la parte cambiante es la que interesa. El primer proceso, el menos convencional, extrae información global ligada a la estructura gráfica de la portada. El segundo enfoque, más clásico, se funda en la extracción de las líneas del texto (título, autor, editorial, etcétera) y en el reconocimiento de los caracteres que las componen.

Lenguaje natural, oral y escrito

Hasta aquí se ha hablado de la visión. Para desarrollar las funciones definidas hasta ahora, el sistema MAIA tiene que estar capacitado para comprender el lenguaje natural, sea hablado, sea escrito o a través







8. CAMARA DE VIDEO de la biblioteca electrónica de MAIA. La videocámara observa la escena circundante: en cuanto alguien o algo entre en su campo visual, lo advierte y separa del fondo la imagen mediante un proceso muy simple. Si las imágenes consecutivas son idénticas la escena permanece estática. Pero si se producen diferencias de interés, la parte que varía es la imagen del objeto que acaba de penetrar en el campo. La figura ilustra los pasos del proceso de extracción de la imagen de un libro: imagen del fondo (*izquierda*), imagen del libro que acaba de entrar en el campo (*centro*) e imagen binaria de la diferencia entre las dos (*derecha*). Idéntico procedimiento se repite ante la presencia de una cara.

del teclado. Debe también generar textos orales y escritos. Debe, en suma, poder interactuar con operadores inexpertos usando un interfaz multimedial que incluye, además del lenguaje hablado y escrito, la señalización de imágenes, gráficos, programas de realidad virtual, etcétera. Todo ello con el fin de facilitar una relación fluida con MAIA y redoblar sus prestaciones.

En el campo del reconocimiento del lenguaje hablado, las investigaciones se centran en el modelo del lenguaje. El objetivo final es la creación de un subsistema de reconocimiento independiente del hablador, que consienta a un usuario hablar con los brazos del sistema MAIA en un lenguaje conexo (esto es, hablando sin pausa, entre una palabra y la siguiente) y en condiciones de ruido más o menos normal para un entorno de oficina.

El grupo de investigación sobre la elaboración del lenguaje natural, además de las actividades ligadas al reconocimiento del lenguaje hablado, desarrolla temas del mayor interés, verbigracia, la generación de informes, elaboración de textos y traducción semiautomática. Amén de dialogar con el usuario, se prevé que el sistema MAIA pueda producir informes en lenguaje natural sobre sucesos ocurridos o aportar descripciones de situaciones complejas. Por ejemplo, el usuario puede solicitar al conserjo que llame a una persona o envíe un robot a la oficina para repartir un informe: cumplida su misión, el sistema debe rendir cuentas al usuario y comentarle cualquier dificultad presentada.

Un componente ulterior que se pretende integrar es el de un subsistema para la elaboración de textos, piénsese en un sistema capacitado para resumir las noticias de interés para el usuario a partir de una lectura del periódico. O también un sistema que ayude a encontrar la jurisprudencia relativa a determinada ley. El desarrollo de tales sistemas requiere potentes instrumentos de análisis lingüístico, en parte distintos de los utilizados para el diálogo. Con vínculos todavía mayores, se propone dotar al sistema de la capacidad de interactuar con un usuario extranjero (inicialmente a través del conserje y, luego, a través de la bibliotecaria electrónica), traduciendo un texto en su lengua. De importancia son también los aspectos ligados a los factores humanos: el interfaz hombre-sistema debe permitir al usuario interactuar con MAIA en modalidades propias del repertorio típico de las relaciones humanas.

Para desarrollar las funciones previstas, el sistema MAIA ha de conocer el entorno IRST, no sólo desde el punto físico, sino también desde el punto de vista organizativo. Estamos, por ello, consagrados a la realización de una "plataforma" de conocimientos relativa al IRST, a disposición de MAIA y del usuario. A grandes rasgos, tenemos tres tipos de conocimientos: estructurales (concernientes a la estructura organizativa, al personal y a los recursos materiales del instituto), de procedimiento (relativos a la normativa adoptada por la organización) y modelos de los agentes (no sólo información sobre los individuos, sino también la información que éstos emplean en el desempeño de su propia actividad).

Aprendizaje, elaboración y memoria

La plataforma experimental de MAIA acaba de nacer y ya se vislumbran los primeros frutos de la integración. De acuerdo con nuestro enfoque, un comportamiento inteligente ha de estar capacitado para la evolución autónoma, aprendiendo a interactuar cada vez mejor con el entorno, acumulando conocimiento y experiencia. Se precisa una gran capacidad de aprendizaje, y no sólo de datos y conocimientos elementales (percibir la presencia de un nuevo mueble en el pasillo y actualizar por ende el mapa), registrar la cara de una persona nueva para su posterior reconocimiento o añadir una nueva palabra al vocabulario. Se requiere que el sistema sepa deducir de la experiencia nuevos comportamientos y estrategias y, por consiguiente, las tácticas para realizarlos.

En los sistemas de hoy, a cada función le corresponden procedimientos y algoritmos creados ad hoc

por sistemas apropiados, flexibles y capaces de utilizar datos y conocimientos obtenidos mediante experiencia, pero siempre programas ideados por el técnico y no autónomamente por el sistema. Con esta imposición, el conjunto de los comportamientos es "cerrado": está limitado a los previstos por el programador. Es necesario, sin embargo, que el sistema aprenda nuevas funciones, es decir, que el conjunto de sus comportamientos sea "abierto" y actualizable a través de la experiencia.

Atacar e intentar acotar este problema constituye nuestro principal objetivo científico de los próximos años. Apenas planteado, surge una duda fundamental. Si a cada nueva función le debe corresponder un procedimiento específico, su número, y por tanto el de los programas, deberá crecer continuamente. ¿Es razonable? ¿Es acaso práctico? ¿Podremos crear un mecanismo tan general que sea capaz de inferir de cualquier conjunto de experiencias los procedimientos idóneos? ¿Existirá un mecanismo de inferencia tan poderoso? Y si existiera, ¿qué camino se debería recorrer de una manera práctica?

Un sistema tal, con un número de programas que crece continua y autónomamente, parece poco plausible, complicado y en absoluto dominable. Y ahora la vía alternativa: sustituir la elaboración por la memoria. En lugar de seguir cálculos de ruta midiendo distancias entre paredes y obstáculos, el robot aprende a andar por el centro del pasillo asociando a cada imagen la orden de dirección introducida por el instructor. Después de haber memorizado un número suficiente de copias de imagen-comando, es capaz de navegar solo, incluso en entornos desconocidos. Al robot le basta con extraer de la memoria la imagen más parecida a aquello que está viendo y aportar a los actuadores el comando de dirección a aquélla asociado.

Hemos comprobado que el robot navega con soltura. Hasta comete menos errores: el enfoque parece más fiable que el fundado en procedimientos y algoritmos de cálculo de la ruta, y está mejor preparado para afrontar situaciones imprevistas. Si después se dotase al sistema de un elemental "espíritu de instinto de conservación", gracias al cual siempre que el robot se precipitase contra un obstáculo forzase un comando en la dirección opuesta al precedente, y lo memorizara junto con la imagen que tiene delante, entonces no se precisaría instructor alguno: el sistema aprendería a navegar solo. Hemos sustituido la elaboración de medidas de distancia y cálculos de ruta (trayectoria) por un proceso mnemónico de asociación de imagen-comando.

El enfoque se nos ofrece convincente, eficaz y sencillo. Sustituir en todas partes la elaboración por la memoria. Y ello es lo que se intenta hacer con los enfoques de tipo conexionista, hoy pasados de moda, basados en las redes neuronales por su semejanza arquitectónica con el sistema nervioso. También éstas pueden reputarse operantes con memoria asociativa: para adiestrarlas basta con presentarles una serie de ejemplos y la correspondiente respuesta requerida. La red se modifica (variando los pesos de las conexiones entre nodos) y es capaz luego de dar la respuesta correcta incluso a estímulos algo distintos de los correspondientes a los ejemplos. Creo que la idea de fondo es válida, pero el camino que hay que recorrer hasta que nuestras redes puedan acercarse a las prestaciones de las redes neuronales genuinas es todavía muy largo.

Tal vez no pueda reducirse todo a memoria. (O tal vez sí.) Pero esta es otra historia. ¿Cuál de las dos vencerá, la memoria o la elaboración? Una cuestión palpitante en la que se trabaja en todo el mundo y que también nos ayuda a entender algo de nuestro proprio cerebro, de la inteligencia natural.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MACCHINE CALCOLATRICI E INTELLIGENZA. Alan M. Turing, en *La filosofia degli automi*, dirigida por Vittorio Somenzi y Renato Cordeschi. Boringhieri, Turín, 1986.

COMPUTATIONAL MODELS OF LEARNING. Dirigido por L. Bolc. Springer Verlag, Berlín, 1987.

UN APPROCCIO INTEGRATO ALL' INTELLIGENZA ARTIFICIALE: IL PROGETTO MAIA DELL' IRST. Luigi Stringa, en *AI*IA Notizie*, 4. n.º 1, págs. 13-19, 1990.

MACCHINE E COMPORTAMENTO INTELLIGENTE. Luigi Stringa, en *Capire l'artificiale*, dirigido por Massimo Negrotti. Bollati Boringhieri, Turín, 1990.

NATURAL LANGUAGE AND EXPLORATION OF AN INFORMATION SPACE: THE ALFRESCO INTERACTIVE SYSTEM. Oliviero Stock, en *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (IJCAI-91), e, págs. 972-978, 1991.

A PROJECT FOR AN INTELLIGENT SYSTEM: VISION AND LEARNING. Tomaso Poggio y Luigi Stringa, en *International Journal of Quantum Chemistry*, 42, págs. 727-739, 1992.

Ciencia y empresa

Telecomunicaciones

Descifrar el código postal

Los países desarrollados han de hacer frente a un reto hercúleo: conseguir que un servicio concebido sobre bases decimonónicas —sin escatimar esfuerzo humano en todas sus operaciones— pueda sobrevivir en la era de las velocísimas telecomunicaciones. Naturalmente, la supervivencia ha de apoyarse en dos pilares básicos: la efectividad (en esencia, seguridad y rapidez), y la rentabilidad (un servicio público jamás debe ser ruinoso y ha de aspirar a autofinanciarse). Resulta, pues, fundamental que todas las tareas implicadas se automaticen al máximo, ya que el coste de la mano de obra se ha convertido en el factor de mayor incidencia en el presupuesto total del servicio de Correos.

Por citar un país, el coste de clasificar 1000 cartas a mano en Estados Unidos asciende a 40 dólares, y ese mismo trabajo realizado por máquina costaría solamente 4 dólares. El servicio postal maneja allá un volumen de 550 millones de cartas diarias —de las que un 85 % tienen las señas por medios mecánicos, y las demás, a mano—, por lo que es fácil imaginar la repercusión económica de un proyecto de automatización. Para ello es imprescindible contar con dispositivos que sean capaces de explorar e interpretar eficazmente las direcciones que figuran en los sobres de las cartas, estén escritas con la tipografía mecánica o la caligrafía, variable y no sujeta a normalización, que sea.

Conscientes de la importancia del problema, los expertos se han embarcado en programas de desarrollo de sistemas informáticos para el reconocimiento de caracteres. Uno de ellos es el de la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo. El algoritmo que han realizado interpreta muy bien los caracteres impresos, pero en una prueba cualquiera fallará en siete de cada diez sobres escritos a mano. Se han hecho numerosas pruebas, y el sistema no ha podido, por ejemplo, identificar en un código postal el dígito “7” con un trazo cruzado, ni descifrar escrituras vacilantes o enmarañadas que cualquier cartero, sin embargo, no tendría dificultad en comprender. Queda patente ahí la superioridad indiscutible de la complejísima red neuronal que es el cerebro humano sobre las actuales elaboraciones de la tecnología de la programación. No hay auxiliar de clasificación que tarde más de cinco segundos en clasificar adecuadamente un sobre manuscrito, y en cambio la máquina de la universidad neoyorquina tarda hasta un minuto en inspeccionar una carta, que quizá tenga que desechar al final por serle ilegible.



Las lectoras de caracteres de correos (aquí mostradas) se suplementarán con equipos capaces de reconocer escritura y tipografía de difícil lectura en los sobres.

Pese a ello, los servicios postales de las naciones avanzadas apuestan por los clasificadores mecánicos. El objetivo, siguiendo con el ejemplo norteamericano, es que la eficacia de los sistemas automáticos llegue a ser de un 90 % para los sobres tipografiados y de un 50 % para los manuscritos. No hay otro problema que le exija más a la lectura óptica de caracteres (Optical Character Reading, OCR). Según Charles E. Stenard, supervisor de Sistemas de Información Avanzada en los Laboratorios Bell de AT&T, “estos programas de investigación postales dan alas, qué duda cabe, al desarrollo técnico”.

El año pasado, el servicio de Correos de los EE.UU. firmó nueve contratos, cuyos valores varían entre cientos de miles y millones de dólares, con AT&T, IBM, Westinghouse, TRW, Hughes Aircraft y otras empresas punteras. El objetivo es desarrollar una máquina que pueda procesar sobres impresos o manuscritos rechazados por las lectoras ópticas de alta velocidad. Se quiere que esas cartas queden marcadas con un código de barras que contenga la dirección, lo que permitiría clasificarlas sin intervención humana.

El contrato de producción, que uno de los proveedores estima en 150 millones de dólares, no llegará a un tercio del coste del proyecto, hoy abandonado, de conseguir una nueva generación de OCR de alta velocidad basado en técnicas de reconocimiento más avanzadas. La máquina en proyecto realizará los mismos trabajos, pero más despacio.

No es lo mismo discernir una dirección en un sobre que capacitar a un ordenador para que reconozca letras escritas a mano con pluma electrónica, tecnología que ya está en el mercado. En este último equipo, el ordenador ha de reconocer sólo la

letra de un individuo, lo que se logra con un "adiestramiento" específico; en cambio, un sistema para el servicio postal ha de pasar del caso general al particular, careciendo además de la esencial información sobre presión, movimientos y tiempo que puede recogerse al tiempo que una persona escribe.

El desglosar la escritura cursiva en letras separadas es una de las tareas mas difíciles con que se enfrenta un ordenador. Para éste, una "l" manuscrita se parece sospechosamente a una "e" que se ha estirado. Por esta razón, el grupo de investigación de Buffalo no se ha limitado a analizar los caracteres individuales, sino que ha intentado captar la forma y longitud de la palabra completa, tomando como pista la frecuencia de las letras ascendentes y descendentes.

Otro enfoque —basado en los caracteres individuales— a menudo recurre a una técnica tomada del reconocimiento del habla, una cadena de Markov en la que se asigna a cada letra una probabilidad que depende de la letra que supuestamente la precede. "En ningún caso se puede confiar mucho en una sola fuente de información, por lo que tendremos que utilizar una variedad de técnicas", dice Venu Govindaraju, del equipo universitario neoyorquino.

Puede adoptarse un formato de dirección normalizado que elimine falsas lecturas, ventaja que los ordenadores de pluma no tienen. Al cotejar el código postal con la ciudad, la calle y el número, por ejemplo, la búsqueda del destinatario suele reducirse a unas diez posibilidades dentro de la base de datos (de muchos gigabytes) del servicio postal.

Hasta ahora, el reconocimiento automático es lento como una tortuga, visto desde los baremos normales de Correos. Se tarda varios segundos en descifrar un código postal, y aproximadamente un minuto en reconocer una dirección completa: nada parecido a las 13 cartas por segundo que es el objetivo del programa. Para alcanzar esa meta probablemente habrá que emplear ordenadores y algoritmos especializados que procesen los datos en paralelo o que imiten la capacidad de reconocimiento de configuraciones que tiene el cerebro humano.

Synaptics, dinámica compañía del Valle del Silicio creada por dos pioneros de la tecnología de semiconductores, ha desarrollado pastillas del tipo de red neuronal especializadas en reconocer direcciones impresas. También ha investigado sobre el reconocimiento de códigos postales manuscritos a velocidades de miles de caracteres por segundo.

Mejor que algoritmos paso a paso, una red neuronal podría decidir dónde empieza y termina cada cosa dentro del bloque que las señas forman, tarea capaz de desconcertar fácilmente a una máquina. Ralph Wolf, investigador de Synaptics, describe la paciente labor de adiestrar a la red con 800 ejemplos de direcciones tipografiadas suministradas por Correos, con diferentes tamaños, tipos de letra y posiciones en el sobre. Tras largo tiempo de entrenamiento, la red llegó a reconocer, generalizando un patrón extraído de cientos de muestras, en qué parte del sobre estaban las esquinas de las señas. Aun así, tuvo dificultades con el sobre de una organización religiosa en el que se había dibujado una cruz que se extendía hasta la zona de señas.

El descifrado de "sietes" con el trazo cruzado puede también hacer perder un tiempo que Correos no tiene. Hasta los administradores del servicio de correo han empezado a dudar si se mantendrá este servicio de aquí a veinte años. Robert Lucky, vicepresidente de investigación aplicada de Bell Communications Research, explicó a directivos de servicios de correos de todo el mundo reunidos en el reciente simposio postal los resultados de examinar —sin rigor científico— su propio correo durante cuatro días. En dicho período recibió 37 objetos: nueve catálogos, 14 papeles desechables, ocho facturas, tres avisos, dos revistas y sólo una carta personal, que es más o menos lo normal para una familia media.

Proveedor al fin y al cabo de información electrónica, Lucky calculó que los catálogos de ventas a domicilio habían copado más de la mitad de la cantidad de bits equivalente a todo ese correo. El mensaje, según Lucky, puede resumirse en una palabra: publicidad. "Si los anunciantes no creyesen que el correo es un medio para meterse en las casas que ofrece una buena relación entre costo y eficacia, se expondrían ustedes a ver desaparecer el suelo bajo sus pies", les dijo a los directivos de correos.

Si bien muchos prefieren todavía el papel, Lucky indicó que la información contenida en su paquete diario de correo —alrededor de un gigabit— podría transmitirse por redes de fibra óptica capaces de transportar al hogar hasta 30 billones de bits por día. Esto quizá conduzca a la muerte lenta de los catálogos de venta a domicilio, uno de los puntales del servicio de Correos en ciertos sitios, pues si pudiera hacerse llegar la página pertinente a la persona interesada, no haría falta que enviasen el catálogo entero.

Puede que un día la gente lea los catálogos o el periódico en la pantalla de su televisor. Las futuras generaciones de carteros electrónicos, sin embargo, quizá saquen aún provecho del trabajo de investigación que el servicio de correos promueve hoy. Al fin y al cabo, la conversión de papeles a electrones y viceversa será siempre, en cierta medida, inexcusable.

Centrales nucleares

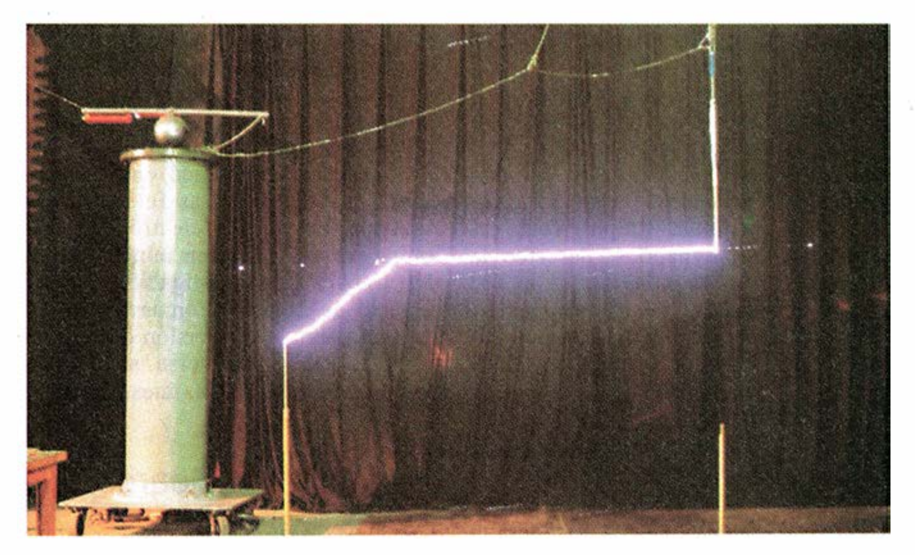
Un cebo para el rayo

En febrero de 1992, un rayo provocó la parada automática del reactor número uno de la central nuclear de Shimane, de 460 megawatts, perteneciente a la Empresa Central de Energía del Japón. Para evitar otro suceso semejante, en Shimane o en cualquiera de las 40 centrales nucleares que funcionan en Japón, laboratorios de empresas privadas y de las universidades de Osaka, Nagoya y Kyushu han ensayado un método de prevención poco corriente.

Siguiendo los pasos de experimentos realizados en los Estados Unidos y en la Unión Soviética hace veinte años, los japoneses se aprestan a desarrollar conductos formados por haces láser que sean capaces de guiar los rayos de un modo seguro hasta el suelo. Los investigadores sugieren que el haz láser podría conseguir tal efecto mediante la creación de una trayectoria ionizada a lo largo de la cual correría el rayo, como el agua en una tubería.

El año pasado, un grupo de la Universidad de Osaka, la Compañía Eléctrica de Kansai y el Instituto de Tecnología del Láser logró guiar correctamente un rayo artificial a lo largo de una distancia de 8,5 metros, estableciendo una plusmarca mundial. En el Instituto Central de Investigación para la Industria de la Energía Eléctrica del Japón, próximo a Tokio, trabaja otro grupo, con la intención de batir la marca de Kansai. En uno de los enormes edificios de pruebas del Instituto, los rayos guiados por láser recorren habitualmente tres metros en horizontal por el suelo del laboratorio, revestido de cobre.

Se producen las descargas eléctricas cuando los impulsos de radiación infrarroja procedentes de un láser de dióxido de carbono de 300 megawatts son dirigidos a través de la separación que existe entre un elec-



Un rayo artificial es guiado por un haz láser a un poste conectado a tierra en el Instituto Central de Investigación de la Industria de Energía Eléctrica de Japón.

trodo metálico colgante y un poste unido a tierra. La energía del láser calienta el polvo y otras partículas contenidas en el aire, vaporizándolo en glóbulos de plasma que se alinean como una cadena de diminutos conductores entre los electrodos. Aunque el plasma sólo existe durante una fracción de segundo, es suficiente para que se precipite al suelo una chispa eléctrica de 600.000 volts, "con un ruido estrepitoso", apostilla Takatoshi Shindo, jefe del grupo de investigación del Instituto.

Shindo espera estar preparado a fines de este año para trasladar los ensayos al terreno exterior de pruebas del Instituto, en la cima de una meseta elevada de la prefectura de Tochigi, al norte de Tokio. La instalación dispone de un generador de impulsos de 12 millones de volts, el más potente del mundo. En una prueba realizada con este equipo en julio pasado, el grupo de Shindo guió un rayo a lo largo de un trayecto de siete metros de longitud, y ahora pretenden ampliar esa distancia hasta 17 metros por lo menos.

Con tal propósito, el grupo ha estado ensayando nuevas lentes de forma cónica capaces de focalizar la luz del láser a lo largo de distancias mayores que las lentes cóncavas. Tales lentes, junto con los láseres de haz múltiple, pueden perfeccionarse para prolongar los plasmas hasta diez o más metros. El grupo de Shindo ha ideado también una ingeniosa manera de usar los relativamente cortos haces de plasma producidos por la tecnología existente: una combinación de divisores de haz y de lentes produciría una curva segmentada de plasma que de las nubes llegaría a una torre unida a tierra.

El sistema se utilizará primeramente en invierno, pues en esa época las bases de las nubes tormentosas están mucho mas cerca del suelo que en verano. Aun así, Shindo cree que esta nueva, modernísima cometa de Franklin servirá de cebo, y alejará con ello los rayos de los objetivos peligrosos.

Nuevos materiales

Cáscaras de nueces

¿Tendrán los proyectistas de cascos contra accidentes o de alas de avión que inspirarse en las nueces? Así lo cree Julian Vincent, codirector del Centro de Biomimética de la Universidad de Reading, Inglaterra. Sus capas externas, células llenas de una substancia resinosa endurecida, resisten eficazmente los esfuerzos de compresión, mientras que las capas interiores, fibrosas, parecen dificultar la fractura tensil.

La cáscara de la nuez es delgada; su eficacia depende de su lograda configuración. "La naturaleza cree que es difícil conseguir un buen material, y que una buena estructura, en cambio, es barata", observa Vincent.

La directa exposición de Vincent quedó sepultada entre los miles de trabajos presentados en la conferencia de otoño de la Sociedad de Investigación de Materiales, que tuvo lugar en Boston. Pese a su lacónico título, "Nueces", y aunque de paso contase también que golpeó con un peso de péndulo una corteza de coco para ver si podría servir de casco para monopatinadores, no puede decirse de Vincent que sea un chiflado.

La observación de la naturaleza en busca de ideas para el diseño de objetos —estrategia denominada biomimética— requiere que se examine microscópicamente todo, desde la seda hasta el análisis de proteínas semejantes al caucho que se encuentran en las cucarachas. Vincent se ha especializado en el estudio de cómo se fracturan y rompen las cosas. El y sus colaboradores aplican los principios de la mecánica de fracturas a manzanas, patatas, maderas y cuernos de animales, por citar sólo algunas clases de materiales.

El centro está actualmente contratado por la Asociación Británica de Investigación de Molienda y Horneado para que estudie la mejora de la molturación del trigo. El año pasado año, este grupo de diez personas se dedicó a examinar patatas con rayos X y microscopios ópticos por encargo de Unilever, la multinacional británico-holandesa. Se cree que el perfil mecánico de la patata, que se registrará en forma de modelo informático de elementos finitos, proporcionará a Unilever datos que posibilitarán la manipulación genética de la rigidez de las paredes de las células, con la finalidad de hacer los tubérculos menos sensibles a los golpes y ataques.

No todo el mundo comparte tal optimismo. Rustum Roy, profesor de ciencia de materiales en la Universidad estatal de Pennsylvania, insiste en que se ha obtenido muy escaso fruto de la idea, algo antañona ya: "éste es un campo muy antiguo en el que se ha avanzado muy poco y donde lo que buscan todos es dinero".

La biomimética, en efecto, no se ha incorporado aún a la corriente general de la ingeniería de materiales. Westvaco, empresa papelera con sede central en Nueva York, adaptó ideas de algunos de los colaboradores de Vincent en la patente, fechada en 1983, de un compuesto en el que la orientación de fibras inmersas en cartón es similar a la de la celulosa en la madera. Por un corto tiempo, se tomó en consideración este producto, por su resistencia, como posible material para chalecos antibalas. Pero Westvaco, según Vincent, no sabía muy bien qué hacer con el material, y abandonó el proyecto.

Optica

Lentes de contacto

Se sabe que las primeras lentes de contacto se fabricaron a finales del siglo XIX con vidrio de material base, pero no fue hasta los años cin-

cuenta cuando empezaron a difundirse, al coincidir con la producción y uso generalizado de los plásticos, así como el desarrollo del instrumental óptico que posibilitó la medición de la curvatura corneal.

Las lentes de contacto permiten ya la correción de prácticamente cualquier defecto ocular, pero su uso puede provocar la aparición de toda una serie de complicaciones derivadas de la alteración del metabolismo corneal. Las primeras en manifestarse son la variación del flujo lacrimal con el consiguiente descenso de la presión osmótica y modificación de la tensión superficial de la lágrima, descenso de la concentración de oxígeno y glucosa, acidez y, por último, una modificación de la temperatura superficial del ojo. Todo ello puede afectar al epitelio, al estroma y endotelio corneal provocando microquistes, microvesículas, vascularizaciones, reducción del espesor corneal, aumento de la fragilidad, merma de sensibilidad y, en casos extremos, pérdida de la transparencia del humor vítreo. Pero la adaptación de una lente de contacto no implica forzosamente la aparición inmediata de estas complicaciones.

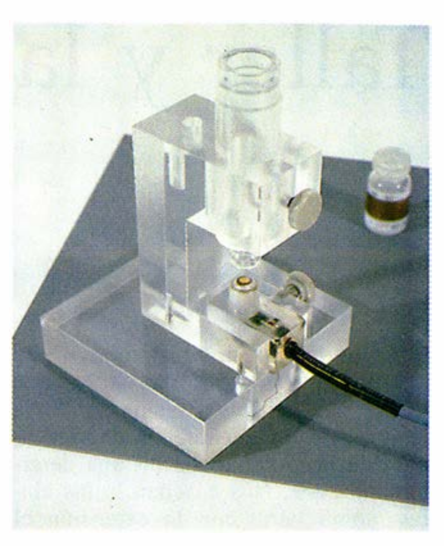
Los primeros problemas surgidos tras colocar una lente de contacto se deben a una hipoxia corneal, a una deficiencia en la oxigenación de la córnea. El aporte de oxígeno, en condiciones normales, se realiza fundamentalmente a través de la película lacrimal que está en contacto directo con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, ¿qué sucede durante las horas de sueño? ¿Seguimos disponiendo de la aportación de ese gas durante las seis u ocho horas que permanecemos con los ojos cerrados? ¿Cuál es la cantidad mínima de oxígeno que debe fluir hacia la córnea para que no se produzcan daños? Las respuestas hemos de empezar por buscarlas en la conjuntiva tarsal del párpado superior que, gracias a su gran vascularización, hace que el oxígeno se difunda desde los capilares hasta la córnea, proporcionándole la cantidad mínima de este gas.

Los materiales que se utilizan en el diseño de lentes de contacto han de tener una gran facilidad de transporte de oxígeno, es decir, deben mostrar una alta permeabilidad al mismo para evitar en lo posible las alteraciones metabólicas. Pero esto no es suficiente justificación, también es preciso considerar la dureza, rigidez, biocompatibilidad y humectabilidad, entre otras propiedades. El material de uso más común es el polimetilmetacrilato (PMMA), impermeable al oxígeno, de difícil humectabilidad y excesiva rigidez, si bien excelente y de larga duración en el caso del paciente que logra adaptarse al mismo. En la fabricación de lentes de contacto porosas se emplean, además, los derivados del butirato de acetil-celulosa (CAB), que, pese a sus reconocidas humectabilidad y biocompatibilidad, amén de una mayor permeabilidad al oxígeno y anhídrido carbónico, son materiales poco homogéneos, con tendencia a formar depósitos externos.

Se recurre a veces a las siliconas, materiales blandos que facilitan la acción del bombeo de la lágrima por debajo de la lente y, por tanto, un aporte continuado de oxígeno. Ahora bien, su alta permeabilidad al oxígeno no impide que sean fuertemente hidrófobas y produzcan una imagen fluctuante cada vez que se rompe la película lacrimal sobre la lente por acción del parpadeo. Por último, en los años setenta y ochenta se desarrollaron los hidrogeles, polímeros derivados del metacrilato de 2-hidroxietilo (PHEMA), capaces de absorber cantidades variables de agua (entre 38 y 90 % de su peso inicial), lo cual los convierte en materiales de alta biocompatibilidad y alta permeabilidad al oxígeno. Carecen de poros propiamente dichos. Se trata, en efecto, de estructuras poliméricas tridimensionales que dejan intersticios intermoleculares de 20 a 100 angstroms, lo que permitirá el paso de la pequeña molécula de oxígeno (1,4 Å) a su través.

El término permeabilidad presenta problemas a la hora de escogerlo como parámetro para caracterizar el transporte de oxígeno a través de la lente de contacto. Estas, por lo general, tienen un espesor que no excede de unas pocas décimas de milímetro, tamaño suficiente para que el transporte se vea afectado por la delgada capa lacrimal que las cubre. La interacción entre la lágrima y la lente, el denominado "efecto frontera", desencadena la alteración brusca de propiedades de transporte en la zona de separación de ambas fases. Estos efectos frontera son difíciles de estimar y se hallan supeditados a la técnica experimental utilizada en la determinación de la permeabilidad. Por esta razón se prefiere recurrir a la transmisibilidad como parámetro propio de cada lente de contacto; abarca, bajo una misma magnitud, la permeabilidad, el espesor y efectos de frontera.

La medida de la permeabilidad de una lente de contacto debe realizarse en unas condiciones que imiten lo mejor posible su disposición normal en el ojo, ya que ha de tomar en consideración el efecto que ejerce la lágrima en el transporte de oxígeno. Por esa razón se suele trabajar con la lente sumergida en una solución isotónica (normalmente NaCl al 0,9 %) y apoyada sobre un par de electrodos esféricos de oro y plata de un radio similar al de la córnea. Imponiendo una diferencia de potencial constante entre el electrodo de oro y el de plata, se reduce electroquímicamente el oxígeno que atraviesa la lente, registrándose una corriente entre ambos electrodos que guarda relación directa con la permeabilidad y transmisibilidad de las lente.



Dispositivo electroquímico para la determinación de la permeabilidad de una lente de contacto. En el cilindro superior se crean atmósferas con diferentes proporciones de oxígeno; en la parte inferior se observan los electrodos esféricos de plata (el más externo) y oro (el interno) entre los que se aplica una diferencia de potencial constante y suficiente para la reducción del oxígeno. La corriente eléctrica medida entre ambos electrodos está relacionada con la transmisibilidad y permeabilidad de la lente de contacto.

El diseño de nuevos materiales susceptibles de ser utilizados en la fabricación de lentes de contacto tiene en cuenta las peculiaridades del metabolismo corneal, así como las propiedades intrínsecas del material. Actualmente existen materiales excelentes y métodos de control rápidos para conocer el estado de una lente, pero las condiciones higiénicas a las que sean sometidas por parte del usuario, serán las determinantes para evitar las complicaciones oculares derivadas del uso de dichas lentes. (Javier Navarro Laboulais. Dpto. de Química Física, Univ. de Valencia.)

Henry S. Horn

Biodiversidad en el jardín

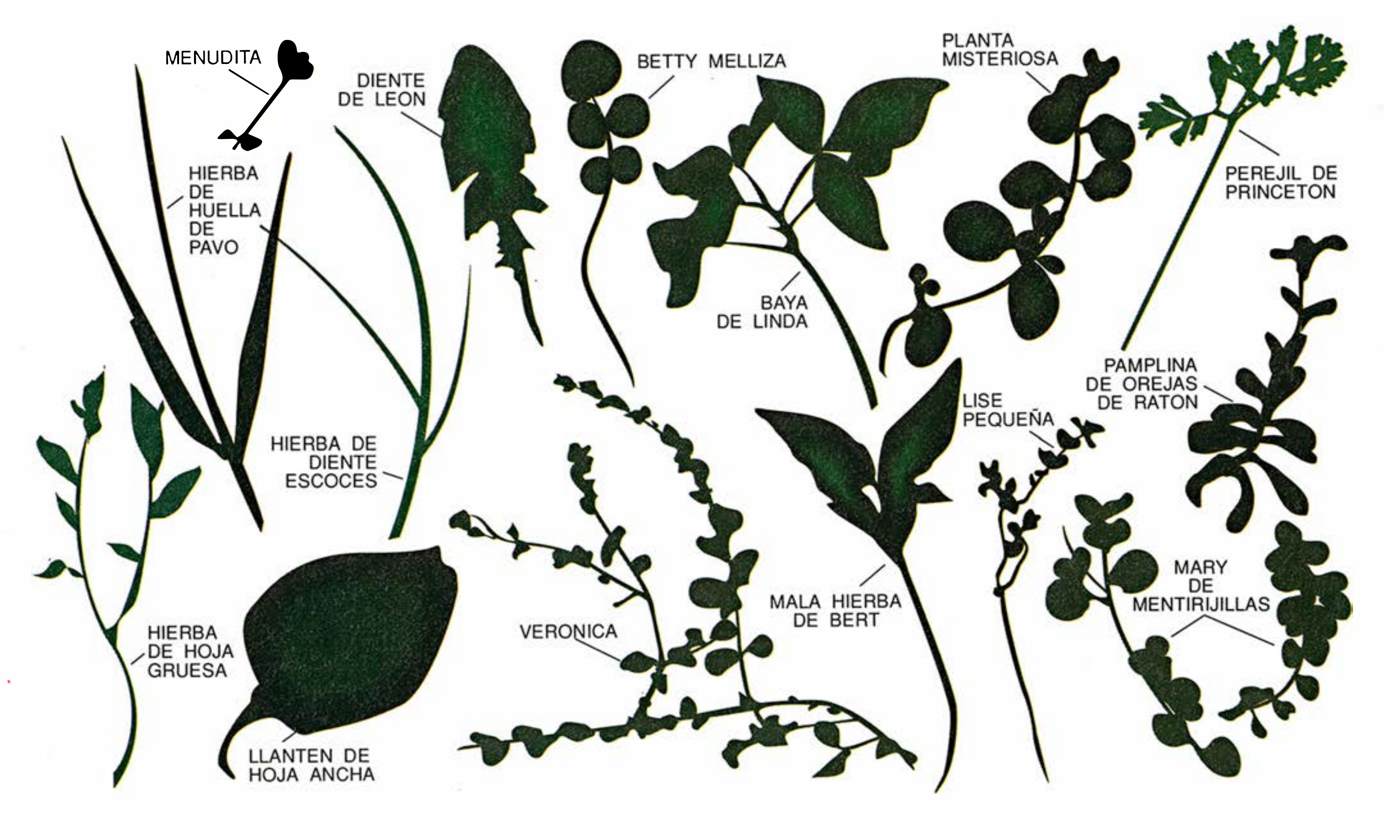
Los inventarios sistemáticos de parcelas de bosques y campos nos ayudan a planificar de la mejor manera posible la conservación de la vida salvaje en una determinada zona. Nos enseñan, a las claras, cómo varía con la extensión el número de especies que contiene la parcela examinada, y nos ofrecen además un punto de vista cuantitativo sobre los efectos de la actividad humana en la diversidad biológica local. Con ellos, conservacionistas, planificadores ambientales y políticos pueden estimar la superficie mínima de terreno que se precisa para proteger un determinado porcentaje de la flora y fauna naturales. A este respecto, resulta particularmente útil la relación entre la diversidad de animales y plantas de bosque y el tamaño de las "islas" forestales en un "mar" urbano o suburbano. Tales relaciones se conocen técnicamente como curvas de especies-área.

HENRY S. HORN dibuja viñetas satíricas y canta *blues*, madrigales y música coral. También es profesor de ecología y biología evolutiva, y director del programa de estudios ambientales de la Universidad de Princeton. Agradece a Bristol-Myers Squibb su patrocinio, a Elizabeth Horn que le ayudase a pergeñar y dirigir este proyecto, a los maestros de escuela su participación, y por último, en el orden, que no en la consideración, a Robert May, William Bonini, Sheldon Judson, Patricia Matuszewski y Amy Wolman sus constructivos comentarios y respaldo moral.

Contar las especies de plantas que hay en el césped es una instructiva aproximación a estos métodos cuantitativos. (Tabular cosas que se arrastran o vuelan es difícil y suele caer fuera del alcance de los aficionados.) Diseñé inicialmente este proyecto como ejercicio en un curso de verano de geología matemática y biología de campo para profesores de Enseñanza General Básica. Los maestros lo han adaptado para que los niños de los primeros cursos se ejerciten en la exploración y clasificación. Pero hemos extraído tanta información de los análisis provisionales, que tengo pensado utilizar el guión en los cursos universitarios de introducción al análisis de datos y a la extrapolación.

El proyecto puede, en efecto, realizarse a cualquier nivel de complejidad, desde la exploración infantil hasta el análisis profesional. Aunque cada nivel plantea sus propias cuestiones importantes sobre la conservación, el problema básico es siempre el de cuánta superficie de terreno se necesita para que pueda darse en él diversidad de especies.

El césped que los maestros y yo seleccionamos estaba detrás de un aparcamiento del recinto universita-



1. Formas de las hojas; se utilizaron como criterio clasificador de las distintas especies vegetales. El "descubridor" daba nombre a la planta, un honor que produjo varias denominaciones singulares. Sólo se muestran unas cuantas de las 34 especies encontradas.

rio de Princeton. Trabajamos en tres equipos, integrado por cuatro personas cada uno.

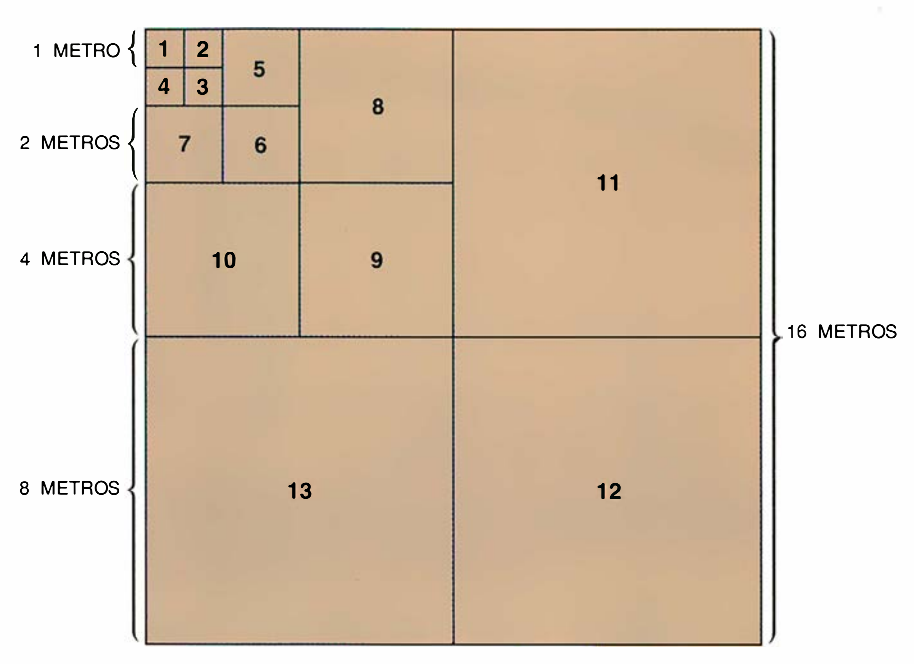
El primer equipo parceló el césped, con estacas y cordeles, en bloques encajados unos en otros. Los bloques variaban en tamaño de un metro cuadrado a 16 por 16 metros. Empezamos por establecer los límites de la superficie mayor. Puesto que el suelo se pandeaba ligeramente (lo que hacía que la suma de los cuatro ángulos fuera superior a 360 grados), cuadramos la parcela haciendo que las diagonales fueran de igual longitud. Dividimos este cuadrado grande en cuatro superficies iguales, y después fuimos subdividiendo una de las esquinas hasta que los últimos bloques tuvieron sólo un metro cuadrado. Cintas métricas y cartabones cuyos lados guarden la relación 3-4-5 son de gran utilidad para este trabajo.

Desde luego, el área puede aumentarse, o los cuadrados más pequeños subdividirse, dependiendo del número de especies encontradas durante la investigación. Hay un criterio de andar por casa que nos dice el tamaño adecuado de la superficie: un biólogo de edad madura y algo miope (como el viejo entomólogo de Julio Verne) ha de poder cruzarla a pie y contar al hacerlo unas 12 especies manifiestamente distintas. De una tal superficie se obtendrán de 30 a 40 especies cuando se la examine mejor.

Para las especies de plantas familiares, utilizamos el nombre vulgar. En la versión profesional del experimento, la flora ha de recibir nombres técnicos. Nuestro modelo cuantitativo no requería tanto, y por pura diversión, definimos nuestras propias "especies" a partir de diferencias en las hojas, imitando el proceso con el que se establecieron, desde el siglo XVIII, los nombres de las especies de verdad [véase "Número de especies que habitan la Tierra", de Robert M. May; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1992].

Erigimos un "museo" de papel; en él, un "conservador" escribía el nombre de cada especie encontrada y pegaba con cinta adhesiva un ejemplar junto al nombre. Mientras un equipo ponía los límites del muestreo, otros dos exploraban la región en busca de nuevas especies. Cualquier espécimen que mostrara rasgos nuevos era llevado al museo. Los investigadores comparaban el ejemplar con las especies nombradas y determinaban su novedad consultando con el conservador.

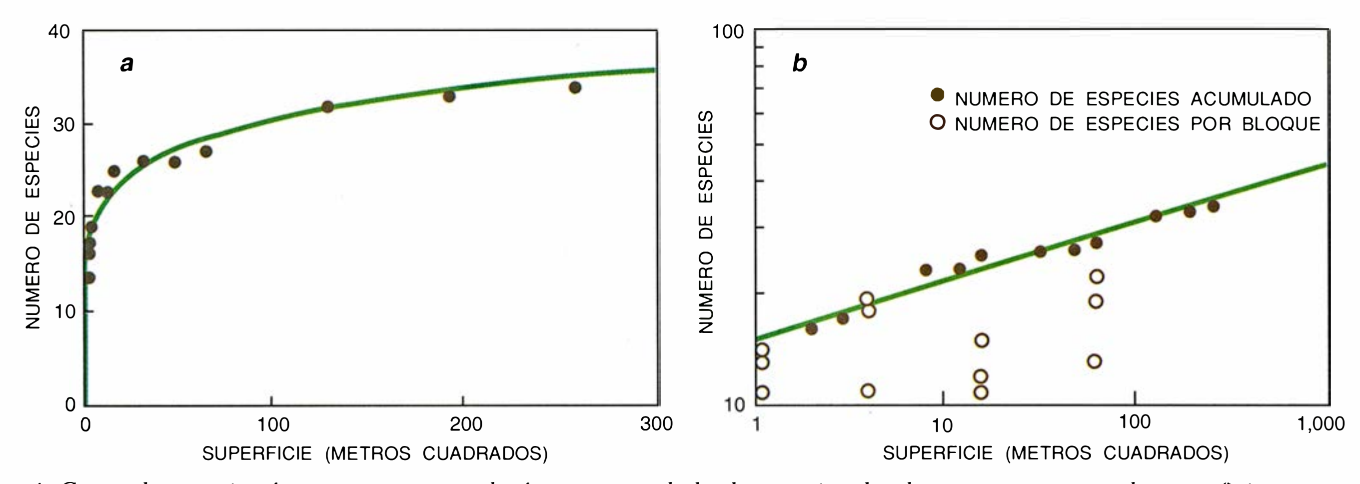
Si el ejemplar era realmente nuevo, se añadía a la colección. El des-



2. Parcelas de muestreo. Constaban de 13 subdivisiones, con una superficie total de 256 metros cuadrados. Las parcelas se numeraron en espiral, en el sentido de las agujas del reloj.

ESPECIES	NUMERO DE BLOQUE 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
HIERBA DE HUELLA DE PAVO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HIERBA DE DIENTE ESCOCES	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
HIERBA DE HOJA ANCHA PEQUEÑA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
HIERBA DE HOJA GRUESA	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TREBOL BLANCO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
TREBOL HIBRIDO	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
TREBOL DE LUPULO				✓			✓			✓			✓
ACEDERA DE TRONCO AMARILLO	✓		✓	✓		✓	✓	✓			✓		✓
PAMPLINA DE OREJAS DE RATON	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
TRES HOJAS DE JAMES							✓			✓			✓
BARBARA DE HOJA LISA		✓		✓	✓		✓		✓	✓			✓
PELUDA DE HARRY				✓	✓		✓						✓
LLANTEN DE HOJA ANCHA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MARY DE MENTIRIJILLAS	✓	✓			✓				✓		✓	✓	✓
DIENTE DE LEON	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MENUDITA					✓		✓						✓
ARBOL DE CENIZA BLANCA								✓		✓			
VERONICA		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
MALA HIERBA DE BERT							✓						✓
FRESA INDIA			✓			✓		✓			✓	✓	✓
SETA DE SOMBRERILLO PARDO					✓								
LISE PEQUEÑA	✓				✓							✓	
MUSGO DEL JEFE	✓	✓		✓	✓		✓			✓			
VERONICA DE CAMPO	✓											✓	
PAMPLINA CONFUSA											✓	✓	
PIMPINELA ESCARLATA										✓			✓
BETTY MELLIZA												✓	
LLANTEN DE HOJA ESTRECHA					✓								
PLANTA MISTERIOSA					✓						✓		✓
SHARON DE NOVA TERRA											✓		
PEREJIL DE PRINCETON											✓		
ZUMAQUE VENENOSO											✓		
BAYA DE LINDA													✓
MALA HIERBA DE ERNIE											✓		
TOTAL POR BLOQUE	14	13	11	13	19	11	18	11	12	15	19	13	22
TOTAL ACUMULADO	14	16	17	19	23	23	25	26	26	27	32	33	34
SUPERFICIE DEL BLOQUE	1	1	1	1	4	4	4	16	16	16	64	64	64
SUPERFICIE ACUMULADA	1	2	3	4	8	12	16	32	48	64	128	192	256

3. Estadillo con el que se llevaba la cuenta de las especies encontradas. Las marcas rojas señalan el número del bloque más pequeño en el que se encontró la especie. El total acumulado es la suma de las marcas rojas acumulada de un bloque a otro. Las superficies se dan en metros cuadrados.



4. Curva de especies-área; muestra que el número acumulado de especies de plantas aumenta con la superficie muestreada (a). *El gráfico logarítmico de los datos muestra una línea recta* (b), *que proporciona las constantes* c *y* z [véase el recuadro adjunto]. *Sin embargo, los gráficos del número de especies por bloque eran incoherentes. La fatiga del experimentador es una posible razón de la inexactitud.*

cubridor tenía el honor de ponerle nombre. Sin proponérnoslo, bautizábamos las especies a la manera de los taxónomos profesionales: las dedicábamos a nuestra inmortalidad o a la memoria de un amigo, o bien nos fijábamos en los caracteres del holotipo, su hábitat o plantas emparentadas. Nuestra condición de aficionados nos permitía ciertas libertades; así, por mero capricho, pusimos los nombres de "Peluda de Harry", "Menudita" y otras licencias denominativas por el estilo.

Una vez terminado el recuento, sacamos la suma total de cada bloque. También acumulamos los números de especies por bloque, empezando con los del cuadrado menor y añadiendo luego los de los bloques subsiguientes hasta que la parcela entera quedaba incluida (en la figura 3 se ofrece el estadillo de un muestreo.) Aun sin análisis técnico, los resultados suscitan muchos comentarios interesantes.

Algunas especies son comunes a casi todos los bloques; otras son raras. Ejemplares hay que aparecen aislados o dispersos; otros forman grupos, pero éstos, a su vez, no se repiten o se hallan dispersos. ¿Existe alguna pauta que explique qué especies son comunes y se hallan bien diseminadas, cuáles se encuentran agrupadas, cuáles son raras y se hallan dispersas?

Para buscar pautas, dibujamos gráficos del número de especies en relación al área escudriñada, y ello de varias maneras. En primer lugar, dibujamos el número acumulado de especies para cada cuadrado estudiado, empezando por el rincón más subdividido. La curva resultante muestra que encontramos el 75 por ciento de nuestras especies en superficies de una veintena de metros cuadrados.

A fin de comprobar que esta pauta cuantitativa que habíamos obtenido se ajustaba a la ecuación tradicional de especies-área, dibujamos los mismos datos sobre ejes logarítmicos. Algunos profesores recelaban de los logaritmos, pero los cuadrados de muestreo ya estaban graduados de forma que sus longitudes se fuesen multiplicando por dos, y las áreas por cuatro. Es fácil construir una escala logarítmica para el número de especies si se marcan intervalos fijos en papel milimetrado lineal a distancias de 1, 2, 4, 8, 16 y así sucesivamente. El gráfico bilogarítmico de nuestros datos es una línea recta, de acuerdo con la generalización teórica que la ecuación de especies-área expresa.

En el mismo gráfico situamos los resultados de cada bloque. Esperábamos que las parcelas mostraran la misma pauta que los datos acumulados, quizá con un poco de variación, con una pendiente un poco menor y un punto de corte con el eje en que se representa el número de especies ligeramente más bajo; la razón de que creyésemos esto se funda en la curva acumulativa, que debe subir continuamente con el aumento del área. Para nuestra consternación, descubrimos que la pauta de los bloques por separado era algo contradictoria.

Pensamos en varias causas posibles. Un grupo confesó que había sido más bien poco cuidadoso en su estudio. Les interesaba más la morfología de lo que hallaban que los

Cómo derivar la curva de especies-área

Para muchos grupos de organismos, el número de especies encontradas aumenta a medida que lo hace la superficie. Puede expresarse adecuadamente la relación mediante la igualdad

$$S = c A^z$$

donde S es el número total de especies observado en una zona rastreada, A es el área de dicha zona, y c y z, constantes que se determinan a partir de los datos.

Cuando se toman logaritmos en ambos lados, se obtiene que

$$\log S = \log c + z \log A.$$

Esta ecuación es una generalización empírica. Muchos investigadores están empecinados en postular teorías que la "predigan". La veracidad de esta ecuación puede comprobarse, para una región y un grupo de organismos determinados, dibujando en escala logarítmica los datos de especies y áreas, y viendo si se ajustan a la línea recta prevista. Si lo hacen, la relación podrá caracterizarse mediante dos parámetros libres tan sólo, c y z.

Por apropiada que esta ecuación pueda resultar, la curva de especies-área será a menudo más convincente desde un punto de vista retórico en cuanto argumento a favor de la conservación si la relación del número de especies al área se representa linealmente. Haciéndolo de esa manera, está claro que cualquier cosa que se haga por encontrar tantas especies como sea posible tendrá rendimientos decrecientes.

números. Algunos reconocieron que a la segunda hora de ir arrastrándose por las parcelas mayores habían empezado a estar cansados. Es posible que los fallos de un grupo o de unos cuantos individuos se compensasen al mezclarse en los datos acumulados con los de otros grupos o individuos, lo que explicaría por qué los datos acumulados sí eran congruentes. Sin embargo, también es posible que subestimáramos la pendiente de la curva de especies-área para nuestro césped. En cualquier caso, los maestros estaban tan impresionados por la regularidad de los datos acumulados, que abrieron una animada conversación acerca de cómo realizar estudios más rigurosos la próxima vez.

El debate suscitó nuevas preguntas. ¿Pueden extrapolarse nuestros resultados con seguridad a áreas mayores que las muestreadas? ¿Cuánta superficie se precisaría para preservar el 50 por ciento, o incluso el 90 por ciento, de las especies regionales propias del césped? ¿En cuánto diferiría la diversidad de plantas en "islas" de césped auténticas, situadas, por ejemplo, en aparcamientos asfaltados, de la que se observaría en muestras del mismo tamaño marcadas en un césped continuo? ¿Qué enseñanzas proporciona este análisis para la creación racional de parques urbanos?

Este ejercicio es sólo una metáfora de las aplicaciones verdaderamente prácticas que tienen las curvas de especies-área. No por ello deja de ser un buen paso empírico encaminado a que el lector haga sus propios recuentos de árboles, arbustos, enredaderas, flores silvestres, helechos, setas u hortalizas en retazos de tamaño variado. Represente gráficamente el número de especies en función de la superficie, piense en los resultados y lléveselos a la autoridad pertinente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FRAGMENTED FOREST: ISLAND BIOGEOGRAPHY THEORY AND THE PRESERVATION OF BIOTIC DIVERSITY. Larry D. Harris. University of Chicago Press, 1984.

WEEDS. Alexander C. Martin. Western Publishing Company, 1987.

DIVERSIDAD ECOLÓGICA Y SU MEDICIÓN. Anne E. Magurran. Vedrà. Barcelona, 1989.

NATURE RESERVES: ISLAND THEORY AND CONSERVATION PRACTICE. Craig L. Shafer. Smithsonian Institution Press, 1990.

LA DIVERSIDAD DE LA VIDA. Edward O. Wilson. Editorial Crítica. Barcelona, 1993.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Mil y una coincidencias

Creo haberles hablado ya del matemago Matthew Morrison Maddox. Al igual que todos los miembros del *Círculo Mágico*, ha jurado no revelar jamás la clave de sus proezas. No obstante, si el lector es despierto —matemáticamente, se entiende—, no le resultará demasiado difícil adivinar los secretos de sus prodigios, de los más sencillos, quiero decir.

Imaginemos la escena. Un teatrillo en una calle perdida de Marsella. Maddox, en el escenario, de jefe berberisco, tocado con un magnífico turbante que oculta el desierto capilar de su azotea, acaba de partir en dos una botella de Klein, de manera tal que ahora, en su lugar, tiene dos bandas de Möbius. Tal vez crea el lector que es tarea muy sencilla, y, ciertamente, para un matemático lo es; pero Maddox opera con una botella de vidrio, y las dos bandas de Möbius también lo son. Estos "detalles" son los que me desconciertan en sus actuaciones. Supongo que se trata de trucos de prestidigitación, pero no se me alcanza el modo en que los hace.

En este momento, empieza un nuevo número:

MADDOX: Necesito la ayuda de una joven del público. (Se acerca a la primera fila de butacas.) Buenas tardes, señorita. ¿Tendría usted la bondad de ayudarme? (La joven se ruboriza convenientemente, pero acepta.) ¿Sería tan amable de decirnos cómo se llama?

VANESSA: Esto..., me llamo Vanessa.

MADDOX: Vanessa, voy a rogarle que suba usted al escenario. (La ayuda a subir, y le indica que se siente a una mesita. Sobre ésta, una pequeña caja roja; al lado, tiza y una pizarra de mano.) Veamos, Vanessa: ¿qué tal se le da a usted el cálculo mental?

VANESSA: Bueno...

MADDOX: A mí, fatal. Quizá resulte útil una calculadora. (Pasa las manos sobre el cabello de la joven, y saca una de su melena.) Los números tienen su magia, como ya sabe. Y para demostrarlo, voy a cubrirme los ojos con esta venda y a volverme de espaldas... así. Y ahora, haga el favor de anotar su edad en la pizarra. ¿Lo ha hecho ya?

VANESSA: Sí.

MADDOX: Mire ahora en la cajita roja; encontrará unas tarjetas. He escrito en ellas los números de 1 a 16. Por cierto, Vanessa: ¿sabe usted qué son los números primos?

VANESSA: Desde luego. Son los enteros positivos que únicamente son divisibles por sí mismos y por la unidad.

MADDOX: ¡Estupendo! Y todos los demás números son compuestos. Haga el favor de anotar su edad en la calculadora, y vaya después sacando las tarjetas una por una. Si el número extraído es compuesto, tire la ficha al suelo; si es primo, multiplíquelo por el número que indique la calculadora. Y siga usted operando de la misma forma hasta acabar con las fichas. ¿Lo ha comprendido bien?

VANESSA: ¡Claro!

MADDOX: Empiece, pues, si hace el favor. Avíseme cuando haya terminado, pero no me diga el número que muestra la calculadora.

VANESSA (va sacando las fichas y calculando): ¡He terminado!

MADDOX: Muchas gracias, Vanessa. Ha llevado a cabo un cálculo muy largo y ha obtenido un número imponente... de seis cifras, me parece.

VANESSA: Así es. Pero, ¿cómo sabe...?

MADDOX: Matemagia, querida joven, matemagia. Estoy seguro de que, en este momento, está pensando que si me diera el resultado, yo podría recuperar el número original efectuando cierto cálculo de parecida dificultad.

VANESSA: Parece razonable, sí.

MADDOX: Pero no voy a preguntarle el resultado. Bastará con que me diga una de las seis cifras y enseguida, instantáneamente, yo le diré su edad. ¿De acuerdo? Bien, pues si es tan amable, dígame la segunda cifra.

VANESSA: Seis.

MADDOX (sin dudarlo un segundo): ¡Tiene usted 22 años! ¿Es correcto, verdad? Haga el favor de mostrar al público el número anotado en la pizarra. (La chica obedece. Es 22. Fuertes aplausos.)

Terminado el espectáculo, fui a visitar a Maddox a su alojamiento.

"¿Ha podido usted descubrir el misterio?, inquirió.

–¿Se refiere al truco de la edad anotada en la pizarra?



–Precisamente. Me parece que corresponde a su especialidad."

Asentí con el gesto.

"Se basa en 1001, ¿no es cierto?"

Maddox se rio, sin soltar prenda.

"Para mayor tranquilidad de espíritu, debe usted explicarme con precisión el significado de su enigmático comentario, pero ante todo..."

Se sacó del aire un sacacorchos, y me lo entregó juntamente con una botella de tinto del país y dos vasos.

"Vaya abriéndola, por favor."

Me esforcé en vano, hasta que descubrí que el filete se arrollaba a izquierdas y que para clavarlo había que hacerlo girar en sentido contrario al habitual. Llené los dos vasos; el mío se derramó directamente sobre mi camisa. La mancha viró al azul, fue tornándose más y más desvaída, hacia el verde, y por fin desapareció. Sin decir palabra, me pasó otro vaso en sustitución del primero.

"Bueno —dije yo— hay trucos numéricos muy sagaces basados en que 1001 = 7 × 11 × 13. Su característica común es que al multiplicar por 1001 un número de tres cifras, como el 567, sea por caso, se obtienen las mismas cifras repetidas: 567 567.

–Va usted por buen camino.

–La idea básica consiste en ocultar que se está multiplicando por 1001. Podemos para ello ir multiplicando por 7, 11 y 13 por separado. En el truco de usted, Vanessa tuvo que multiplicar por todos los números primos comprendidos entre 1 y 16, o sea, por 2, 3, 5, 7, 11 y 13. No es costumbre considerar primo al número 1, pero en nuestro caso resulta indiferente incluirlo o no en la lista. La joven va seleccionando los primos de las tarjetas conforme van apareciendo, quizás en orden aleatorio para despistar más, lo que en nada afecta al resultado final.

–Evidentemente, murmuró Maddox. ¿Y después?

–Tomemos la edad real de Vanessa: 22 años. Si la multiplicamos por 2 × 3 × 5 × 7 × 11 × 13 resulta lo mismo que al multiplicarla primero por 2 × 3 × 5 = 30 y luego por 7 × 11 × 13 = 1001. El producto por 30 se obtiene multiplicando por 3 y añadiendo un cero, y resulta 660. Al multiplicar por 1001 se repiten las cifras, dando 660660. En general, la pantalla de la calculadora mostrará la serie *ab*0*ab*0, siendo *ab* el triple de la edad de la dama. Aunque haya seis cifras, bastará conocer las dos primeras.

–En efecto. Pero yo sólo le he pedido la segunda.

–Que en nuestro caso era 6. El triple de la edad es de la forma *a*6.

EDADES CORRESPONDIENTES A LAS SEGUNDAS CIFRAS DE LA PANTALLA										
CIFRA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
EDAD	20	27	24	21	28	25	22	19	26	23

Ahora bien, un número es múltiplo de 3 si y solamente si la suma de sus cifras es divisible por 3, por lo que *a* tiene que ser 0, 3, 6 o 9. El triple de la edad tendría que ser, pues, 06, 36, 66 o 96, y la edad, 2, 12, 22 o 32 años. Ahora bien, cualquiera es capaz de adivinar la edad de una persona joven con 10 años de margen; así es como halló usted el 22.

–Se le ha escapado algún detalle, pero en lo esencial anda usted en lo cierto.

–Permítame adivinar un poco más. La persona no debe tener más de 33 años; de lo contrario habría más de seis cifras en la pantalla. Vamos a ver... Para reducir las posibilidades, habría que elegir siempre personas entre 19 y 28 años. E incluso aunque la estimación a simple vista fallase en unos cuantos años, siempre sabríamos distinguir si una persona tiene 17 años o 27.

–Más o menos.

–Así que mientras usted dice 'Su edad es...', calcula la cifra que falta y divide por 3."

Movió la cabeza negativamente.

"Ni siquiera. He practicado el truco tantas veces, que ya sé la respuesta en cuanto me dan la cifra. Compruébelo. Déme usted la segunda cifra, y yo le diré la edad, que supondremos comprendida entre 19 y 28 años.

–De acuerdo. Siete.

–19 años.

–Ocho.

–26 años.

–Dos.

–24 años.

–En efecto, dije. Después de su actuación, ya en casa, preparé una tabla. Resulta fácil aprenderla de memoria.

Todo esto —seguí diciéndole mientras llenaba los vasos otra vez— me recuerda un interesante problema matemático. La curiosa descomposición de 1001 en factores primos, 7 × 11 × 13, es responsable de una de las coincidencias más curiosas de todas las matemáticas.

–Un hecho matemático nunca es coincidencia, puntualizó Maddox. No hay en matemáticas nada que no esté predeterminado.

–Me doy perfecta cuenta, repuse, pero yo hablo de algo que parece una verdadera coincidencia. Aparece en el triángulo de Pascal, también conocido como triángulo de Tartaglia.

–La tabla —dijo Maddox— de los coeficientes binomiales, esto es, los coeficientes que aparecen al desarrollar las potencias de un binomio. Cada hilera empieza y acaba en 1; cada número intermedio es suma de los dos que tiene encima, como se puede ver."

Maddox se puso a escribir en su pizarra:

1 1
1 2 1
1 3 3 1
1 4 6 4 1
1 5 10 10 5 1
1 6 15 20 15 6 1

"Además de su natural importancia en álgebra y combinatoria, dije, el triángulo de Pascal es muy interesante en teoría de números. La fórmula general para C^r_n, que es el *r*-ésimo coeficiente de la *n*-ésima fila, viene dada por:

$$C^r_n = \frac{n!}{r!(n-r)} = \frac{n(n-1)...(n-r+1)}{r(r-1)...3.2.1}$$

Así, por ejemplo,

$$C^6_{14} = \frac{14.13.12.11.10.9}{6.5.4.3.2.1} = 3003$$

Aunque el procedimiento que define el triángulo es aditivo, la fórmula general utiliza exclusivamente multiplicaciones y divisiones. Lo cual es muy curioso, pues significa que pueden surgir de forma insospechada propiedades que en apariencia poco tienen que ver con la adición.

–No estoy seguro de entenderle bien. ¿Podría darme un ejemplo?

–Desde luego. Supongamos que *n* sea número primo. Entonces, todos los coeficientes de la *n*-ésima fila del triángulo, excepto el primero y el último, son divisibles por *n*.

–Déjeme ver... 5 es primo, y los números de la quinta fila son 1, 5, 10, 10, 5, 1. Exceptuados los unos, todos son divisibles por 5. Ya veo. Pero, ¿qué tienen que ver los números primos con la adición?

–Esa, precisamente, es la sorpresa. La demostración es consecuencia inmediata de la fórmula. El numerador es $n(n - 1)...(n - r + 1)$, que es divisible por *n*; en el caso $r = 0$ su valor es 1 por convenio. El denominador es $r(r - 1)...1$, y, si *r* es menor que *n*, ninguno de estos factores puede ser divisible por *n*. El factor *n* no puede ser simplificado, y C^r_n, que es necesariamente entero, es divisible por *n*.

–Curioso, sí. Imagino que resulta-

REPETICIONES NO TRIVIALES EN EL TRIANGULO DE PASCAL

$120 = C^2_{16} = C^3_{10}$

$210 = C^2_{21} = C^4_{10}$

$1540 = C^2_{56} = C^3_{22}$

$7140 = C^2_{120} = C^3_{36}$

$11628 = C^2_{153} = C^5_{19}$

$24310 = C^2_{221} = C^8_{17}$

$3003 = C^2_{78} = C^5_{15} = C^6_{14}$

ría difícil deducir este resultado de la definición del triángulo por el procedimiento aditivo.

–A pesar de que el triángulo de Pascal haya sido estudiado desde hace muchísimo...

–Desde Pascal, supongo.

–¡Oh, no! ¡Desde mucho antes! El triángulo figura ya en la página de portada de un tratado de aritmética de Petrus Apianus, a principios del siglo XVI; lo encontramos otra vez en un libro de matemáticas chino de 1303. Se le ha seguido el rastro hasta Omar Khayyam, hacia 1100, quien sin duda lo conocía por fuentes árabes o chinas más antiguas. Michael Stifel introdujo el término 'coeficiente binomial' hacia 1500. La fórmula que da explícitamente su valor se la debemos a Isaac Newton. En su interpretación combinatoria, es decir, en cuanto número de formas de seleccionar r objetos en una colección de n, era ya conocida (aunque con distinta notación) por Bhäskara (nacido en 1114).

–De hecho, la teoría de la resonancia morfológica haría pensar que el triángulo hubo de ser inventado en el año 1001..., pero me estoy alejando de la cuestión. A pesar de que el triángulo de Pascal ha sido largamente estudiado, muchas son las cuestiones relativas a él que siguen sin respuesta. Una de las más sencillas fue planteada por David Singmaster en 1971: ¿cuántas veces aparece en el triángulo un número dado?

–Me parece que no le entiendo.

–Es fácil. Tomemos el número 6. Nos lo encontramos tres veces en el triángulo de Pascal. Dos veces en la fila 6 y otra vez más en el centro de la fila 4. Así es, porque:

$$C^1_6 = C^5_6 = C^2_4 = 6$$

Podemos hacernos la misma pregunta para cualquier otro número.

–Ya veo. El número 1 se presenta una infinidad de veces, claro.

–Sí, pero es el único. Singmaster demostró en 1971 que cualquier número n mayor que 1 no aparecerá más de $2 + 2\log_2 n$ veces. Son muchos los números que aparecen por lo menos dos veces, pues las filas del triángulo son capicúas: su segunda mitad es copia retrógrada de la primera. Por tanto, todo número no central (si existe término central, es decir, si n es par) aparece dos veces en la fila.

–Y todo número situado fuera de los lugares 2 o $n - 2$ se presenta al menos cuatro veces, añadió Maddox.

–¿Por qué?

–Bueno, fijémonos por ejemplo en el 15, que aparece dos veces en la línea 6, en C^2_6 y C^4_6, pero emerge también en C^1_{15} y en C^{14}_{15}, puesto que C^1_m y C^{m-1}_m son ambos iguales a m.

–¡Excelente! Sabemos así que muchos números, mejor dicho, una infinidad, aparecen al menos cuatro veces en el triángulo de Pascal. Ahora bien, aparte del 1, no hay ningún número que se repita infinitas veces. El propio Singmaster ha señalado que entre los números menores que 2^{48} sólo hay uno que aparezca ocho veces; todos los demás lo hacen en menos ocasiones. En 1971 hizo la conjetura de que el número de repeticiones está mayorado (o acotado superiormente, como también se dice); esto es: que existe un número fijo k tal que, exceptuado el 1, ningún número aparece repetido más de k veces en el triángulo de Pascal. Para valores menores o iguales que 2^{48}, ese número sería $k = 8$.

–¿Cuál es el número que aparece ocho veces?, quiso saber Maddox.

–Es el 3003, respondí. Y aquí continúa nuestra historia, porque la causa de la óctuple aparición de 3003 estriba en que $3003 = 3 \times 1001$ y en la descomposición de 1001 en factores primos."

Maddox se agitó en su butaca, y extrajo maquinalmente de sus orejas una multitud de pañuelos anudados.

"Me parece que la cuestión bien merece un desarrollo más extenso.

–Sin duda alguna, concedí. Singmaster se sintió intrigado por una configuración que aparece en las filas 14, 15 y 16 del triángulo de Pascal, que comienza con $C^4_{14} = 1001$. La configuración es como sigue:

Línea 14:	1001	2002	3003...
Línea 15:		3003	5005...
Línea 16:			8008...

–He anotado en rojo el número 3003 para hacerlo resaltar más. Esta porción del triángulo contiene toda suerte de peculiaridades. Por ejemplo, la hilera superior constituye la única aparición en una hilera de tres elementos consecutivos proporcionales a 1, 2, 3. Y si dividimos por 1001 los ocho elementos se obtienen los números de Fibonacci 1, 2, 3, 5, 8, hecho resultante de la estructura aditiva del triángulo.

–Déjeme ver, dijo Maddox. El número 3003 aparece cuatro veces en estas líneas, concretamente, en C^6_{14} y en C^5_{15} y en sus simétricos respecto al centro, esto es, C^8_{14} y en C^{10}_{15}.

–En efecto.

–Y el 3003 aparecerá otras dos veces en la línea 3003, como ya he explicado hace poco.

–En C^1_{3003} y en C^{3002}_{3003}.

–Lo que hace un total de seis apariciones. ¿Cuáles son las otras dos?

–¿No le resulta evidente? Se encuentran en la línea 78: C^2_{78} y C^{76}_{78}.

–Pues no. Lo que demuestra que no son evidentes.

–Se trata de una coincidencia, dije yo. Por otra parte, toda la configuración es una colosal coincidencia, que se produce porque $1001 = 7 \times 11 \times 13$. Pero déjeme preparar un poco el terreno. ¿Está usted de acuerdo en que si en una línea cualquiera hay tres términos consecutivos proporcionales a 1, 2, 3, entonces el tercero de ellos volverá a presentarse en la línea siguiente?

–Sí, desde luego. Los números serán a, $2a$, $3a$, y la línea siguiente contendrá entonces la suma $a + 2a$, por la regla de formación del triángulo.

–Perfecto. Y como las líneas son palindrómicas, $3a$ se presentará al menos cuatro veces, dos veces en cada una de estas líneas. Aparecerá también dos veces en la línea $3a$, concretamente, en C^1_{3a} y C^{3a-1}_{3a}. Tenemos así un mínimo de seis apariciones.

–Exactamente.

–Supongamos que, además de lo anterior, $3a$ sea un número triangular, es decir, una suma de enteros consecutivos, como $1 + 2 + ... + m$, y que no es otro que C^2_{m+1}. Tal número aparecerá entonces otras dos veces más en la línea $m+1$, a saber, en C^2_{m+1} y en C^{m-1}_{m+1}, lo que da ocho veces en total.

–Eso lo entiendo. Pero, ¿por qué habría de ser triangular el número?

–No lo sé. No es más que una suposición.

–Si se empeña usted..."

"Me empeño. Examinemos ahora los valores de C^4_{14}, C^5_{14}, y C^6_{14}. Nuestra fórmula da:

$$C^4_{14} = \frac{14.13.12.11}{4.3.2.1}$$

El denominador 4×3 se simplifica con el 12. El 2 restante se simplifica con el 14, y quedan 7. Nos topamos con el $7 \times 11 \times 13$, un número que sin duda ya nos es familiar.

–Sin duda.

–Fijémonos ahora en C^5_{14}, que se deduce de C^4_{14} multiplicando el numerador por 10 y el denominador por 5, que se simplifican dejando un 2, de suerte que $C^5_{14} = 2 \times C^4_{14}$. Tenemos, por fin, que $C^6_{14} = 9/6 \times C^5_{14}$ y así pues, $C^6_{14} = 3/2 \times 2 \times C^4_{14} = 3 \times C^4_{14}$. Estos tres coeficientes son obviamente proporcionales a 1, 2, 3. ¡Pensemos por un momento en todas las coincidencias numéricas que han intervenido! Resulta difícil recordarlas todas.

–Sí, pero nada de esto aclara la cuestión del número triangular, se quejó Maddox.

–Mil perdones. Es que los números triangulares siempre son de la forma $m(m + 1)/2$ y por otra parte, $3003 = 3 \times 7 \times 11 \times 13 = 77 \times 78/2$; este último punto me parece una coincidencia pasmosa.

–Ya entiendo lo que quiere decir.

–Y todavía lo comprendería mejor si intentase demostrar o infirmar la conjetura de Singmaster según la cual el número de repeticiones está acotado superiormente. Llegaría usted a preocuparse por posibles coincidencias extrañas. Resulta difícil conseguir el más mínimo progreso. Nadie sabe resolver este problema, que sigue pendiente.

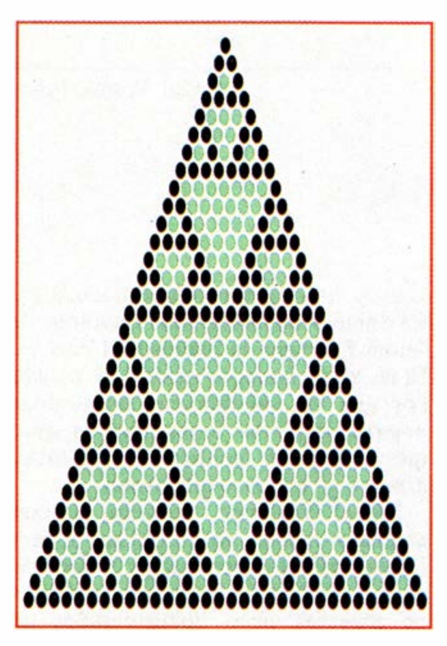
–Lo que recuerda la clase de cuestión que le gustaría proponer a un especialista en matemáticas recreativas, dijo Maddox. No le interesará tanto resolver completamente tal o cual problema, como ver qué puede sacar de él. Por ejemplo: tratar de llevar el cálculo de Singmaster más allá de 2^{48}. ¿Qué más se sabe sobre esto?

–Hasta 2^{48}, la única repetición no trivial es la ilustrada en el recuadro oportuno que se adjunta. Singmaster demostró en 1975 que existe una infinidad de números que aparecen seis veces por lo menos en el triángulo de Pascal. Por ejemplo,

$$C^{39}_{104} = C^{40}_{103} = \\ = 61\,218\,182\,743\,304\,701\,891\,431\,482\,520.$$

Este número colosal (uno de los más pequeños descubiertos por el método de Singmaster) aparece por lo menos seis veces (la verdad es que aparece sólo seis veces, pero ¿no podría suceder que otros de los mayores se repitieran mucho más adelante?)

–Podríamos —propuse yo— tratar de plantear la misma cuestión para el triángulo de Stirling, donde cada número es suma del que tiene sobre sí a la izquierda más el doble del situado por encima y a la derecha. El triángulo de Stirling es como sigue:



Triángulo de Pascal fractalizado. Los números pares aparecen en verde, y los nones, en negro. Los triángulos centrales están compuestos exclusivamente por números pares; el total de puntos de cada uno es un número triangular ($m + ... + 1 = m(m+1)/2$).

1 1
1 3 1
1 7 5 1
1 15 17 7 1
1 31 49 31 9 1
1 63 129 111 49 11 1

O tal vez para el triángulo de Bernoulli:

1 2
1 3 4
1 4 7 8
1 5 11 15 16
1 6 16 26 31 32
1 7 22 42 57 63 64

cuya ley de formación es la misma que la del triángulo de Pascal, con la salvedad de que el extremo derecho está formado por las sucesivas potencias de 2.

–"Estoy verdaderamente asombrado, admitió Maddox. Jamás hubiera pensado que una cuestión tan sencilla como ésta pudiera resultar tan difícil de resolver y nos hiciera navegar por aguas tan procelosas."

Clavó la mirada en su vaso de vino, como si éste le pudiera revelar el secreto del Todo; pero sólo sacó un insecto difunto, que se trocó en girafa y salió huyendo.

"Estas propiedades de 1001 no son coincidencias, ¿sabe usted?

–¿No?, dije yo. ¿Pues qué son, entonces?

–Son... magia."

Libros

Angel Romo, Julio Samsó, Luis Alonso y Ramón Margalef

Morfología estructural

De visu

ATLAS DE BIOLOGIE VEGETAL, por J.-C. y F. Roland y B. Vian. Masson, París, 1990.

PLANT FORM. AN ILLUSTRATED GUIDE TO FLOWERING PLANT MORPHOLOGY, por Adrian D. Bell. Oxford University Press, 1991.

ATLAS OF SEXUAL REPRODUCTION IN FLOWERING PLANTS, por M. Cresti, S. Blackmore y J. L. van Went. Springer Verlag; Berlín, 1992.

Entre los libros auxiliares que acompañan al alumno los atlas desempeñan un papel imprescindible. En muchísimos casos, enseñan a ver e interpretar lo que el ojo inexperto pegado al microscopio es incapaz de distinguir. A falta de un buen modelo español, hemos creído conveniente reunir esta tríada de tres países adelantados en la iconografía botánica, representados por tres editoriales científicas de prestigio.

El *Atlas de biologie végétal* consta de dos volúmenes, dedicado el primero a las plantas sin flores o criptógamas, y el segundo a las fanerógamas, o plantas con flores.

Unen, y ésta es característica compartida por las otras dos obras, la habilidad pedagógica con la belleza de la selección. Basta para ello repasar las formas fantásticas de las algas unicelulares, los dientes del orificio de las cápsulas de musgo o los esporangios de un helecho. En ellos destacan, por un lado, la espectacularidad de sus fotografías, y la claridad de esquemas y dibujos, por otro.

La hornada reciente de atlas ha optado por abandonar la abundancia excesiva de dibujos, idóneos para hacerse una idea de las estructuras, pero poco reales, ya que no dejan de ser una simplificación y una abstracción esquemática. En cambio las fotografías muestran de forma fidedigna la realidad tal cual es. El *Atlas de biologie végétal* ha optado por una vía salomónica: las páginas impares alojan las fotografías, en tanto que las pares contienen esquemas, dibujos y textos explicativos.

En el volumen primero, y con acertado criterio, se introduce al lector en los diferentes ciclos vitales de las algas. Aporta fotografías valiosas de aspectos poco documentados de los hongos: agregación de hifas para formar el plecténquima, los falsos tejidos de los hongos. De entre las micorrizas destacan las fotografías de las de carácter endotrofo, donde se observan hifas del micelio situadas dentro de las células. O la estructura de la roya del trigo, con la explicación de su ciclo y la intervención de dos parásitos diferentes: el trigo y el agracejo. Los helechos nos abren las puertas del dominio de las plantas con tejidos vasculares; hallará el lector microfotografías de las estelas, con sus vasos conductores de savia elaborada, el floema, y de savia bruta, el xilema. En el xilema se ilustran las células con las paredes incrustadas de lignina, es decir, las traqueidas.

Mostrados los ciclos de helechos y briófitos, se pormenorizan los caracteres arcaicos de *Psilotum*, paleoarquetipo de las plantas vasculares y verdadero fósil viviente. Los ginkgos y las cicas, expuestos con sus rasgos prefanerogámicos, cierran el contenido del primer volumen. La calidad del volumen segundo no le anda a la zaga al anterior. La mayor homogeneidad de las plantas superiores permite su análisis en bloque y el estudio global de la anatomía. Se pone el acento en ésta (diferenciación de la raíz, tallo, hojas y flores, embriogénesis y formación de semillas) y en la histología vegetal (formación de las traqueidas, células de los ejes conductores con las diferentes fases de resorción del protoplasma). El lector hubiera quizás esperado un índice de términos botánicos. Glosario que sí encontramos en *Plant form. An illustrated guide to flowering plant morphology*, obra modélica, además, en la resolución de dudas de morfología vegetal. Presenta dos bloques básicos de documentación. En el primero incluye la descripción desde un punto de vista estático de las plantas: una descripción morfológica de lo que se observa en los vegetales y de los caracteres en que hay que fijarse para poder identificarlos. En el segundo se hace una aproximación más dinámica, pues las plantas son seres vivos y tienen un crecimiento.

La morfología contiene 212 entradas de conceptos, explicados de forma gráfica. Para cada uno de ellos se emplea

Gp

Grano de polen de Iris florentina L. *El surco superior es el polo germinal.*

una doble página, donde las ilustraciones a plumilla, más sintéticas, son compaginadas con las fotografías en color que las realzan. En conjunto, la parte gráfica es la que posee el mayor peso específico de la obra. Aquí nos encontramos ante una de las peculiaridades de este libro: la maquetación. El formato apaisado permite que la parte gráfica, situada en los extremos, tenga mayor importancia que el texto, situado en el centro. Otra peculiaridad es que al revés de un libro normal, en que las ilustraciones ayudan a entender el texto, aquí el texto está en función de las ilustraciones. El segundo apartado, con similar estructura y distribución, contiene 100 conceptos. Entre ellos destacan el crecimiento y la arquitectura de la ramificación.

Debemos resaltar la selección de los ejemplos para explicar los diferentes conceptos. Se toman plantas no europeas, básicamente de carácter tropical, que ofrecen un abanico morfológico no exento de dificultades, aquí solventadas en muy buena parte.

Cresti, Blackmore y van Went dividen su espléndido *Atlas of sexual reproduction in flowering plants* en tres partes equilibradamente compensadas: desarrollo de las anteras, desarrollo del pistilo y fase progámica y de fecundación. A cada una le dedican pareja extensión (unas ochenta páginas) y configuración general. Vale decir, definen las notas distintivas del órgano sexual, sus elementos componentes y consideraciones ultraestructurales, que hallan la contrapartida en la iconografía y su explicación pormenorizada.

Del conocimiento elemental de la reproducción sexual de las plantas, que precisa de antera (órgano masculino) y pistilo (órgano femenino), hemos avanzado hacia el desentrañamiento del tejido esporógeno y de las células microspóricas, que, por procesos de meiosis, producen tétradas de microsporas haploides. Esos procesos embrionarios, con los subsiguientes hasta constituir los granos de polen, encuentran aquí su representación plástica. Dígase lo propio del estigma, el estilo y el ovario que forman el pistilo, y de la generación de la célula megaspórica que inicia otra meiosis.

La fase progámica arranca con la llegada de los granos de polen a la superficie del estigma, arrastrados por el aire, el agua, animales o por contacto directo. El proceso de polinización, una auténtica maravilla de la naturaleza, se recoge aquí en soberbias ilustraciones. Como ocurre en la descripción de órganos y procesos. Para que el lector se oriente mejor, un dibujo esquemático simplicísimo enmarca el corpúsculo obtenido por microscopía.

Tres libros, en definitiva, que no deben faltar en la biblioteca especializada ni en los estantes del numeroso público botanófilo en cualquiera de sus ramas. (A. R.)

España musulmana

Agronomía

KITĀB-AL-FILĀḤA. TRATADO DE AGRICULTURA de Abū-l-Jayr. Introducción, edición, traducción e índices de Julia M.ª Carabaza. Prólogo de Expiración García Sánchez. M. A. E., Agencia Española de Cooperación Internacional. Instituto de Cooperación con el Mundo Arabe. Madrid, 1991.

Durante los últimos años hemos podido contemplar la publicación de un número importante de fuentes andalusíes y estudios sobre las mismas. Una buena parte de los nuevos textos editados tiene carácter científico y, entre ellos, sobresale un grupo de libros relacionados con la historia de las ciencias naturales y de la medicina, surgidos de la Escuela de Estudios Arabes de Granada. La primera de estas publicaciones fue el volumen *Ciencias de la Naturaleza en al-Andalus. Textos y Estudios. I*, editados por E. García Sánchez (Granada, 1990), reseñado en estas mismas páginas por J. Vernet, que constituyó una auténtica llamada de atención sobre la aparición de una nueva escuela. En la misma ciudad y en el mismo año aparecieron la edición de un tratado agronómico andalusí anónimo que podría ser el más antiguo texto de esta índole conservado (?) (A. C. López y López, *Kitāb fī tartīb awqāt al-girāsa wa-l-magrūsāat. Un tratado agrícola andalusí anónimo)*, un calendario agrícola y astrometeorológico (M. A. Navarro, *Risāla fī awqāt al-sana. Un calendario anónimo andalusí*) y, muy recientemente (Madrid, 1992), se ha publicado la edición del tratado andalusí de medicina más antiguo del que tenemos constancia manuscrita (Ibn Ḥabīb, *Mujtaṣar fī-l-ṭibb. Compendio de Medicina*, ed. y trad. por C. Alvarez de Morales y F. Girón) así como el *Kitāb al-agḏiya (Tratado de los Alimentos)* del médico del s. XII ᶜAbd al-Malik ibn Zuhr (Avenzoar), editado y traducido por Expiración García Sánchez.

La edición y traducción de la *Agricultura* de Abū-l-Jayr debe situarse dentro de la cadena de publicaciones de la mencionada escuela que recupera un tema cuyo estudio había sido iniciado, en los años cincuenta, por el gran maestro de los historiadores españoles de la ciencia, José M.ª Millás Vallicrosa.

Abū-l-Jayr de Sevilla es uno de los cinco (o tal vez seis) agrónomos que surgen durante el gran período de florecimiento de esta nueva ciencia en al-Andalus, a saber, desde las postrimetrías del califato al comienzo del período almorávide, lo cual implica la práctica totalidad del siglo XI y los principios del XII. De él no sabemos nada, aparte de que era sevillano, que visitó, por lo menos, el jardín botánico del rey al-Muᶜtamid de Sevilla (1069-1091) y que conoció personalmente al gran agrónomo Ibn Baṣṣāl, que floreció en Toledo y Sevilla en la segunda mitad del siglo XI. Carabaza insiste en su carácter de buen botanista —en lo que estoy absolutamente de acuerdo, como veremos— y yo me atrevería a insinuar que era probablemente médico, a la vista de las referencias frecuentes que aparecen en el texto a cuestiones relacionadas con la medicina (recordemos, por otra parte, que Ibn al-ᶜAwwām, a fines del siglo XII, le llama *hakim*, o sea médico con una profunda formación teórica). Nada tiene de particular este carácter polifacético de Abū-l-Jayr, dado que el aspecto teórico de la agronomía andalusí se desarrolló como resultado de la influencia de la teoría humoral hipocrático-galénica y de la botánica-farmacología de la escuela de Dioscórides. Tal como señala el propio Abū-l-Jayr, "los campesinos... ejercen de médicos en lo que respecta a su [i.e. de las plantas] cura" (pág. 365, cf. págs. 371-372 para otros paralelismos entre hombres y plantas).

El libro de Carabaza contiene una introducción general, una edición del texto árabe basada en el manuscrito 4764 de la Biblioteca Nacional de París (el más completo conservado), cotejado con otras fuentes de menor importancia, una traducción castellana del mismo y un apéndice consistente en una reedición y traducción de los pasajes no conservados en el manuscrito de París que aparecen, en cambio, en la edición litografiada de Fez 1358 H. A ello se añaden una lista de fuentes y bibliografía e índices (árabe y castellano) de topónimos y antropónimos así como de plantas mencionadas en el texto. El conjunto es muy correcto. Podría sugerir algunas correcciones tanto al texto árabe como a su traducción,

pero ello implicaría introducirme en un terreno excesivamente técnico. Por otro lado, buena parte de mis observaciones al respecto son simples erratas de imprenta que no han sido salvadas en las tres páginas de la fe de erratas finales. Carabaza ha impreso su libro recurriendo, sin duda, a la autoedición mediante un ordenador y una impresora láser y se echa de menos una cuidadosa corrección de pruebas finales.

El libro de Abū-l-Jayr tiene un enorme interés. Desearía llamar la atención sobre ciertos aspectos del mismo. Aparece, en primer lugar, una noticia inédita: la fundación del jardín botánico real de Sevilla por el abuelo del rey al-Mu^{c}tamid (Abū-l-Qāsim Muḥammad ibn ^{c}Abbād, que gobernó Sevilla entre 1023 y 1042), lo que implica que sería unos cincuenta años anterior a lo que habitualmente se venía suponiendo.

Los jardines botánicos existieron en al-Andalus por lo menos desde la segunda mitad del siglo VIII y son un exponente más del espíritu experimental que caracterizó la labor de los agrónomos andalusíes: podemos leer a este respecto una cuidadosa descripción del método experimental utilizado por Abū-l-Jayr para establecer los momentos más adecuados para la siembra. Asimismo, sólo el hecho de que la agronomía andalusí surge en un contexto en el que una parte de los agricultores no son musulmanes puede explicar el que nuestro autor se refiera a la utilización del estiércol porcino como abono.

El tratado de Abū-l-Jayr, como, en general, todos los textos agronómicos andalusíes, tiene un doble carácter teórico y práctico. Entre los aspectos teóricos de nuestro texto cabe subrayar el interés que demuestra por la reproducción sexual de ciertas plantas, una idea que los agrónomos andalusíes tomaron de la *Agricultura Nabatea* y que parece tener un origen babilónico: nuestro tratado la aplica a la palmera, al alfóncigo y a la mandrágora. En el plano práctico resulta curiosa la mención del uso de fibras del platanero para la fabricación del papel, y la referencia a que ha dibujado el instrumental agrícola que utiliza por más que, desgraciadamente, tales dibujos parecen haberse perdido.

El carácter eminentemente racional del espíritu de Abū-l-Jayr puede observarse en los pasajes que dedica a la lucha contra las catástrofes naturales (plagas de las plantas, sequía, granizo, infertilidad de la tierra, etc.), tema en el que la incapacidad humana en la época daba lugar a un recurso casi constante a remedios de carácter creencial o, simplemente, supersticioso. Tales remedios aparecen, sin duda, en el libro de nuestro autor pero, con frecuencia, están combinados con otros en los que predomina la componente racional, como el recurso al laboreo para remediar la infertilidad de una tierra excesivamente abonada o en la que el agua ha quedado estancada.

No quisiera terminar esta reseña sin aludir a otra publicación reciente que incide directamente en el tema que nos ocupa. En efecto, Julia Carabaza ha estudiado las citas que el gran agrónomo de fines del siglo XII, Ibn al-^{c}Awwām, hace de Abū-l-Jayr y repite la conclusión a la que había llegado ya en una publicación anterior: parte de ellas, por lo menos, no corresponden al *Tratado de Agricultura* sino a una segunda obra de nuestro autor, de contenido botánico cuyo título sería *Kitāb al-Nabāt* ("Libro de las Plantas").

Esta sugerencia de Carabaza ha sido recogida y desarrollada por el investigador marroquí M. ^{c}A. al-Jaṭṭābī, quien, también en 1990, ha publicado, bajo los auspicios de la Real Academia del Reino de Marruecos, la edición de un famoso tratado botánico andalusí anónimo, la *^{c}Umdat al-ṭabīb fī ma^{c}rifat al-nabāt* ("Sostén del médico para el conocimiento de las plantas"), atribuyéndosela al propio Abū-l-Jayr de Sevilla. Este tratado fue dado a conocer, en 1943, por Miguel Asín Palacios, quien subrayó el hecho de que, en él, aparece el primer conato conocido de clasificación taxonómica de los vegetales en géneros y especies, así como un atisbo del concepto de familia botánica, todo lo cual constituye un precedente del sistema moderno de clasificación inventado por Cuvier (1769-1832), cuyo único predecesor directo sería Cesalpino (1519-1603). La identificación de al-Jattabi se debe a criterios externos (tanto Abu-l-Jayr como el autor de la *^{c}Umda* conocieron a Ibn Baṣṣāl, trabajaron en el jardín botánico de al-Mu^{c}tamid de Sevilla y se interesaron por la agricultura) y, sobre todo, internos: Carabaza llamó la atención sobre un tratado agronómico anónimo sirio, titulado *Miftāḥ al-rāḥa liahl al-filāḥa* ("Clave del reposo para los agricultores"), en el que aparecen seis citas de Abū-l-Jayr, tres de las cuales se encuentran, total o parcialmente, en la *^{c}Umda*. Por otra parte, el autor del *Miftāḥ* no sólo atribuye a Abū-l-Jayr el *Kitāb al-Nabāt* al que ya había aludido Carabaza, sino también un libro sobre los *Adwiya mufrada* ("Medicamentos simples"), al que podrían pertenecer las citas que no aparecen en la *^{c}Umda*.

De este modo se plantea la posibilidad de que Abū-l-Jayr fuera el autor de, por lo menos, tres obras: una de botánica propiamente dicha (*^{c}Umda*), una segunda de botánica aplicada o farmacología (*Adwiya mufrada*) y una tercera sobre agronomía (*Filāḥa*), de las que sólo conservaríamos la primera y la tercera. Esta hipótesis de al-Jaṭṭābī resulta enormemente sugerente y tiene muchos visos de ser cierta, pero debe, aún, ser sometida a la prueba de fuego de la comparación con las citas que, de Abū-l-Jayr, hace Ibn al-^{c}Awwām y que, como hemos visto, no se encuentran en la *Filāḥa*. Esperemos que, muy pronto, alguien lleve a cabo esta labor, facilitada enormemente por la existencia de la edición de al-Jaṭṭābī, y que puedan resolverse todas las incógnitas que quedan llegando, con ello, a un mejor conocimiento del desarrollo de las ciencias naturales en al-Andalus a principios del siglo XII. (J. S.)

Ciencia griega

Hippocratica

METHODS AND PROBLEMS IN GREEK SCIENCE por G. E. R. Lloyd. Cambridge University Press; Cambridge, 1991.

TRATADOS HIPOCRÁTICOS. Introducciones, traducciones y notas por Carlos García Gual *et alii*. Editorial Gredos; Madrid, 1983-1990.

HIPPOCRATES IN A WORLD OF PAGANS AND CHRISTIANS, por Owsei Temkin. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1991.

HIPPOCRATIC LIVES AND LEGENDS, por Jody Rubin Pinault. E. J. Brill; Leiden, 1992.

Conviene, cuando nos asomamos a la historia de una disciplina, escuela o corriente de pensamiento en un momento determinado, tener el marco general que nos permita ubicar adecuadamente ese retazo. Para conocer el nacimiento y devenir de las ideas hipocráticas, apostamos sobre seguro recomendando los dieciocho artículos de que consta *Methods and Problems in Greek Science*. Aunque se trata de sueltos escritos a lo largo de una treintena de años, no encontraremos repeticiones enojosas, sino reflexiones actualizadas sobre lo sa-

bido y debatido en la medicina, cosmología, física y matemática griegas, los supuestos filosóficos, conceptos básicos y apuntes exhaustivos sobre teoría, observación y experimentación.

Es un compendio vivo, porque los estudios clásicos están atravesando, desde hace varios años, una etapa de replanteamiento general. Sirva de ejemplo la zoología aristotélica, objeto de los capítulos primero y decimosexto. Una cuestión a primera vista tan anodina como la clasificación, que el tópico restringía a un acierto prelinneano del estagirita, se ha convertido en quicio donde reposa nada menos que la metafísica y la lógica aristotélicas al constituir el referente de las nociones de especie, género, esencia, individuo, definición, jerarquía o niveles del ser y analogía, entre otras.

Junto a notas extensas de interés intrínseco, unas ceñidas como la matemática platónica y otras generales como las cosmologías griegas, hay ensayos provocadores; estoy aludiendo a su intervención en la polémica sostenida por Karl Popper (los presocráticos no apoyaron sus ideas sobre el cambio en la observación de los fenómenos, y me basta una lectura inteligente para inferirlo) y G. S. Kirk (toda ciencia parte de la observación y necesitamos un profundo conocimiento filológico para interpretar el pensamiento de los milesios, eléatas y demás). Lloyd busca una solución de compromiso, en el que viene a conceder la segunda parte a Kirk y matiza su adhesión a la primera parte popperiana.

Introduce la medicina hipocrática en el panorama global de la ciencia. Aborda la autoría de los textos ("la cuestión hipocrática"), las escuelas ("contra quién se escribe *Sobre la medicina antigua*"), el método ("Alcmeón y la disección") y la renovación de Galeno. Se apoya en una perspectiva filológica, aunque no rechaza las incursiones fisiológicas y clínicas.

Disponemos en castellano de una edición en curso de los *Tratados Hipocráticos*, dirigida por García Gual, autor de la introducción general de la obra. Han aparecido ya seis volúmenes, que han vertido libros importantes de la colección hipocrática, y al ritmo que llevan es probable que pronto se redondee al menos la cincuentena que se suponen genuinos.

En la confección de este tipo de obras importa atender a la introducción particular de cada libro, la traducción, las notas y, en menor medida, los índices. En la introducción se expone el origen del texto, si de la escuela coana o cnidia, los puntos fundamentales de la doctrina sostenida, autoría y época aproximada de redacción, estilo y manuscritos o ediciones. Las introducciones de la mayoría de los tratados publicados cumplen las exigencias de nivel requeridas en las ediciones de los clásicos. Condiciones que se satisfacen, asimismo, en las traducciones.

¿Qué decir de las notas? Suelen servir éstas para aclarar determinadas expresiones o palabras, situarlas en su contexto, compararlas con lo dicho en otros lugares, fijar las variantes, etcétera. Lo mismo que en las introducciones, se evidencia aquí el conocimiento que el intérprete posee del tema. En general, las notas de los españoles constituyen otra "traducción", en el sentido de que trasladan, o resumen ahora, lo expuesto por autores foráneos; las aportaciones originales se reducen a disquisiciones filológicas, que demuestran el origen académico de los nuestros.



Representación en marfil de Asclepio, del siglo V de nuestra era.

Hay ensayos creativos, sin embargo, como el trabajo de López Férez en torno a *Sobre los aires, aguas y lugares*. Pero de otros diríase que han errado parte del camino; por citar uno, el volumen donde se recogen con acierto los tratados ginecológicos. Se ha optado, y ésa es feliz idea, añadir unos índices sobre los remedios empleados en la terapia de las enfermedades de las mujeres; pero se ha escogido por guía a Dioscórides cuando lo propio hubiera sido Teofrasto, coetáneo o cuando menos más cercano a los autores cnidios, quien incorpora además la tradición droguista y rizotómica del Egeo. De haber seguido al fitólogo, se hubiera andado con mayor prudencia en la asignación de la especie; a modo de ejemplo, el pino aludido quizá fuera *Pinus halepensis* o *P. pinea*, la lechetrezna pudiera ser mejor *Euphorbia characias*, y así otras (cedro); préstese, asimismo, mayor atención a la correcta transcripción de las denominaciones linneanas (el titímalo no es *Thymus vulgaris* L., página 458, sino la euforbiácea aludida).

Pero confíe el lector en la edición, digna desde muchos puntos de vista. La objeción de mayor peso desborda la competencia de los traductores: falta el texto griego, con cuya ausencia no sólo carecen de sentido las notas léxicas discrepantes de la edición ochocentista de Littré, sino que la propia obra queda incompleta. La excusa del encarecimiento pierde fuerza si recordamos el éxito de la edición trilingüe de la *Metafísica* de Aristóteles, de la misma editorial.

Quizá sin proponérselo, Temkin nos ha legado, en *Hippocrates in a World of Pagans and Christians*, la mejor historia social de la medicina, si no de la ciencia, en el sentido más exigente de la expresión. Con unos mimbres tiempo ha remojados y macerados, este nonagenario patriarca de la medicina clásica ha tejido un cuadro de absoluta diafanidad y sencillez, del que uno no sabe quién sacará más provecho, si el avezado o el aprendiz.

El propósito es ambicioso: quién fue Hipócrates para sus contemporáneos del siglo V antes de Cristo, cómo le vieron griegos, judíos, romanos y cristianos de las centurias subsiguientes, y a qué se debe el peso de su apenas cuestionada autoridad en el Mediterráneo preislámico; en el bien entendido de que Hipócrates va indisolublemente ligado a sus enseñanzas éticas y médicas.

Más de la mitad de la obra está dedicada a la aceptación, y consiguiente incorporación, del hipocratismo en la doctrina de los Padres de la Iglesia; no se trata de una cuestión baladí, pues supone un talante abierto a la ciencia y a la filosofía en unos momentos de autoafirmación frente al paganismo y su mundo ideológico. Temkin hace, además, un esfuerzo especial por no entrar en ningún tipo de valoraciones de las ideas y referencias trascendentes para ceñirse a la tosquedad de los hechos tangibles.

En cuatro páginas introductorias escenifica el marco político, religioso y médico que da abrigo a la exposición: la sustitución de la república romana por el imperio (en que domina un paganismo sincretista), la reforma de Diocleciano en el último tercio del siglo III (persecuciones y asentamiento del cristianismo) y apogeo de Bizancio con Constantino en el año 330 (régimen de libertad entre una ciudadanía mayoritariamente pagana, que va perdiendo fuerza pese al empeño de Juliano y el de ciertas escuelas, así la neoplatónica de Atenas). Por lo que respecta al hipocratismo, a las dos corrientes helenistas formadas (dogmáticos, o defensores de una teoría anatomo-fisiológica que respaldara la praxis, y empíricos, según los cuales era estéril buscar la causa del mal en los humores, elementos o pneuma, cuando la daban la experiencia clínica, el hambre, el frío, el sueño y asimilados), se agregó en tiempos del primer imperio la grey de los metodistas, para quienes la praxis médica debía descansar en el diagnóstico inmediato a partir de los síntomas, que mostraban si el cuerpo o sus órganos se hallaban forzados, relajados o en una condición intermedia. En el siglo segundo Galeno, que se convertirá en el genuino intérprete de Hipócrates, promueve el rechazo de las sectas, así se llamaban las corrientes mencionadas, dentro de una conjunción de teoría y experiencia.

No puede dividirse en el hipocratismo el alma del cuerpo. Compete al médico sanar a éste, devolverle el equilibrio humoral, en tanto que es propio del filósofo sanar el alma con el razonamiento y la disciplina intelectual. El médico debe ser, al propio tiempo, filósofo, y éste no será tal mientras desconozca los principios naturales que respaldan el quehacer del primero. Menos dispuesto se haya a admitir, de entrada, que la enfermedad sea el resultado talmúdico de una ofensa divina, opinión que separa también a los cristianos de los judíos y facilita la asimilación hipocrática en la Iglesia primitiva. La interrelación científico-filosófica se prolongaba en el acto médico, en la ética ante el paciente y su entorno, que adquirió sanción definitiva en el juramento hipocrático, escrito antes del siglo I antes de Cristo, y en los *Preceptos*; se prolongaba también en el derecho, verbigracia, a propósito de la oposición al aborto y la legitimación de hijo nacido en el séptimo mes del matrimonio, considerado viable en la perinatología de Hipócrates.

La alta estima de que venía gozando el asclepíada de Cos entre la clase médica se consolida oficialmente en el imperio con la confección, por Erotiano, coetáneo de Nerón, de lo que se llamará la colección hipocrática, con el reconocimiento de su magisterio por el farmacólogo oficial Escribonio Largo y el compilador Celso, y, sobre todo, con la reelaboración de Galeno. Así pasa a la leyenda, en un doble sentido metafórico y real, cuyos hitos se resumen en el capítulo sexto.

Complete el lector el esbozo que perfila Temkin con las *Hippocratic Lives and Legends*, tesis doctoral de Jody Rubin Pinault. El ritmo aquí es otro, el que separa una visión en el crepúsculo de una vida plena del trabajo primerizo, repleto de ideas, no todas maduradas, aunque muchas innovadoras, como nuevo es el tema escogido: las vidas y leyendas de Hipócrates, valorar su originalidad y fidelidad, mostrándose renuente a negarles todo interés por el mero hecho de haberse escrito la primera cinco siglos después de los únicos testimonios fiables de Platón y Aristóteles. Rubin espiga la leyenda de la liberación de Atenas de la peste con una hoguera, indicativa de la capacidad terapéutica de Hipócrates mostrada en la suspensión de la epidemia, la leyenda de la curación del rey Perdicas de su mal de amores, donde se evidencia la capacidad diagnóstica, y la leyenda del rechazo del ofrecimiento que le hace Artajerjes, rey de los persas y enemigo implacable de los griegos, fabulación ésta que simboliza una conducta ética y patriótica por encima del enriquecimiento personal.

Las leyendas están amasadas con las noticias que aportan las vidas. Tres biografías nos han llegado y las tres redactadas en época tardía: *La vida de Hipócrates según Sorano*, escrita entre los siglos segundo y sexto de nuestra era; el artículo enciclópedico de *Suda*, del X, y los cuarenta y ocho versos sobre Hipócrates de Juan Tzetzes, del XII. Los tres tienen su punto de apoyo en los *Documentos pseudoepigráficos*, más cercanos al entorno hipocrático, aunque no menos imaginados que las vidas; en número próximo a la treintena se agavillan bajo ese epígrafe cartas, alocuciones y un decreto ateniense, espléndidamente editados por Wesley D. Smith en esta misma colección lugdunense de "Studies in Ancient Medicine".

Rubin trae el texto griego original y la versión inglesa del triple relato biográfico. Comenta cada uno, párrafo a párrafo, tras exponer la situación en que aparecen los manuscritos y la suerte histórica de los mismos. Entrada ya en la glosa, aporta las pruebas textuales (análisis interno del propio escrito, cotejo con obras hipócraticas y de otros autores, patrones del género biográfico en el momento de su redacción) y arqueológicas en que se apoya, así como la razón de las leves discrepancias entre una y otra vida con respecto a la genealogía, relación con Demócrito, lugar de enterramiento y memoria de las obras escritas. Labor que completa con el estudio del llamado manuscrito de Bruselas y la filiación de las distintas biografías, que se remontarían, en última instancia, a una misma fuente del siglo segundo.

No acaba ahí el interés del trabajo de Rubin. Extiende su método al hipocratismo árabe en el estudio de la reelaboración de las biografías y leyendas, poniendo de manifiesto el cambio que sufren el desenlace y la lección moral consiguiente. Y se entenderá mejor la evolución, si volvemos al grueso de la obra Temkin, la concepción del hipocratismo que penetró intacta en la nueva mentalidad soteriológica en que se movían Ireneo, Hipólito, Agustín o Teodoreto y Basilio, con los médicos bizantinos. (L. A.)

Fauna ibérica

Cefalópodos

MOLLUSCA, CEPHALOPODA, por Angel Guerra. En *Fauna Ibérica*, volumen primero. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. Madrid, 1992.

Este libro merece una doble consideración, por iniciar una nueva serie sobre la Fauna Ibérica y por sus méritos propios. Se han dado, desde hace tiempo, varios intentos de emprender la publicación de series de monografías sobre distintos grupos de la fauna española; pero

quedaron truncados, a menudo con el primer volumen. Este nuevo proyecto ha empezado con buen pie. De momento han visto la luz dos volúmenes, el que nos ocupa y otro preparado por Francisco Español sobre los *Anobiidae*, una familia de coleópteros (carcomas). Había salido ya como ensayo del formato de la serie (número cero) un fascículo sobre una familia de pequeños coleópteros, debido a Xavier Bellés, que, al parecer, superó las pruebas, puesto que los nuevos volúmenes aparecen con su mismo formato. Hay anunciados más volúmenes en preparación sobre grupos de ácaros, sipuncúlidos, diversas familias de coleópteros, crustáceos branquiópodos y los crisídidos que, por desgraciada errata, en la solapa de la cubierta de este volumen, se colocan entre los coleópteros.

No habrán de faltar colaboradores para una buena serie de volúmenes. Pero las faunas de todo el mundo nos enseñan que se hace progresivamente difícil recorrer toda la escala zoológica, hasta los grupos menos conocidos o más olvidados. Emprender esta obra es valiente y reconfortante, iniciarla sin recurrir a vertebrados, mariposas, ortópteros o libélulas, tiene más mérito y hay que esperar que la continuación revitalice el interés por los estudios taxonómicos y faunísticos que, tal vez, beneficien de su carácter de "asignaturas pendientes" dentro de nuestra ciencia y puedan aprovecharse del interés por la llamada "biodiversidad" y por la conservación de la naturaleza.

El formato y la presentación aparecen impecables. La obra es digna hermana de la *Flora Ibérica* iniciada por el Real Jardín Botánico, en 1986. Es de alabar la decisión del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de propiciar ambas empresas, a sabiendas de que llevarlas a buen término es tarea ardua y, en el caso de la fauna, mucho más dilatada —a menos que la Flora se extienda también a las plantas no vasculares. Quizá la presentación de la Flora haya quedado mejor y tal vez se hubiera podido aprender de ella, igual que del ensayo llevado a cabo con el fascículo 0 de la Fauna, para mejorar en algo la presentación de sus volúmenes. Pero tal como están resultan impecables en su formato, disposición general e ilustración, que es excelente. La solidez de la encuadernación, una característica importante en obras de manejo asiduo, parece asimismo garantizar una duración apropiada (lo mismo que en la Flora, de volúmenes más gruesos).



Pulpo (Octopus vulgaris).

Para todo biólogo marino, los cefalópodos son animales maravillosos. Antes que los dinosaurios, cefalópodos monstruosos y más o menos imaginarios tuvieron cierto protagonismo en la biología popular. Siguen siendo fascinantes para el que no se ocupa profesional y específicamente de ellos y puede admirarlos como espectador sin preocupaciones. Es inolvidable el espectáculo de las potas y voladores saltando fuera del agua, bajo los focos, durante las estaciones nocturnas en las campañas oceanográficas y lo es también la extraordinaria belleza de los pequeños cefalópodos batipelágicos, con frecuencia luminosos, que uno se podría imaginar como grandes monstruos. Estas y muchas más especies se detallan en el libro, que incluye casi un centenar de ellas en la fauna española, frente a unas 650 especies actualmente conocidas en todo el mundo.

Se da una descripción general y suficiente de caracteres anatómicos y morfológicos, claves adecuadas y descripción lo bastante extensa de cada una de las especies españolas, ilustradas, con una gran proporción de figuras originales y nuevas. Toda la ilustración es excelente, aunque este lector piensa que quizá se hubiera podido aprovechar mejor de lo que se ha hecho la oportunidad de introducir láminas polícromas.

Para cada especie se da la distribución geográfica, que en muchos casos no puede ser muy detallada ni complementarse con la ecológica, ni apoyarse en mapas, porque se dispone de menos datos de los deseables; todo un reto. Hay un apartado sobre biología en el que se reúne información muy interesante. También se proporciona información sobre las capturas de especies explotables con valor comercial. Se es relativamente parco en dar información sobre los nombres vulgares, que son más ricos y precisos de lo que se suele pensar. Se incluye la información disponible sobre reproducción, pero se dan relativamente pocos datos en lo que concierne a otros aspectos de la fisiología (producción de luz, migraciones), parásitos y comportamiento. Algunos biólogos marinos echarán en falta información más completa sobre los "picos", tan útiles para identificar las especies comidas en los estómagos de sus depredadores. Pero dadas las características de manejabilidad que ha de tener una fauna, el compromiso general que se plantea para mantener el equilibrio entre las variadas y posibles solicitaciones queda resuelto de manera excelente. La complejidad de la información presentada ha requerido mucho cuidado para evitar en lo posible las erratas tipográficas, de las que pocas han sobrevivido. (R. M.)

Apuntes

La ecología, ciencia reciente, está atravesando un momento de profunda renovación de sus hipótesis fundamentales, como la clásica depredador-presa, o la asociación huésped-planta. Puede tocarle el turno a los nutrientes. Creíase, por ejemplo, que la aportación de carbónico inorgánico disuelto no constituía ningún factor limitante de la productividad primaria oceánica, habida cuenta de que su concentración en el agua del mar superaba la de nitratos y fosfatos (otros macronutrientes de las plantas) en dos o tres órdenes de magnitud, respectivamente. Pero se acaba de comprobar que, en condiciones óptimas de luminosidad y de nutrientes, la tasa de crecimiento de las diatomeas sí depende de la aportación anhídrido carbónico.

La ciencia conjuga los descubrimientos espectaculares, rarísimos, con los progresos lentos y lineales, no menos satisfactorios. De estos últimos nos ofrece un ejemplo reciente la física nuclear. En 1964 Condo sugería que la desintegración característica de mesones negativos (piones y kaones negativos) en la cámara de burbujas de helio podía explicarse por la captura de tales partículas en orbitales metaestables de átomos exóticos de helio. Cinco años después Russell predecía la posibilidad de que esos átomos se formaran por antiprotones en helio líquido; en 1989 la metaestabilidad postulada de kaones y piones en helio líquido recibía confirmación experimental. Este año de 1993 se ha hecho público que átomos de helio con antiprotones formados en estado gaseoso poseen idéntica vida media que en el helio líquido.

El refinamiento técnico se ha apuntado otro tanto. Conocida es la importancia que en muchos materiales revisten las películas o membranas superficiales. Destacan, en particular, las películas epitaxiales, así llamadas aquellas cuya estructura se alinea con la estructura del sustrato. Se ha logrado desarrollar, o hacer crecer que dicen en la jerga, finísimas películas epitaxiales de nylon 6 sobre el grafito, sondeadas mediante microscopía electrónica de efecto túnel. El avance no termina en esa gesta: a diferencia de lo habitual en el crecimiento epitáxico, que era siempre unidimensional, las nuevas laminillas de nylon son bidimensionales.

Tras la oleada de ecologismo que sirvió para que la gente tomara conciencia de la gravedad de expoliar el planeta o someterlo a tensiones sin retorno, comienzan a levantarse voces invitando a la racionalidad para configurar un mundo de desarrollo viable, o sostenible si hacemos concensión al anglicismo imperante. Ello supone cambiar la quimiofobia o alergia a cualquier producto de laboratorio, y a la propia industria química, que se ha extendido por numerosos países, sin excluir los centros de enseñanza. Ha llegado la hora, se dice, de que la gente sepa que el bienestar no tiene otro nombre que el de transformación de las materias primas.

Marte no goza de la tranquilidad de la Luna. Pero los aparatos incorporados a bordo del Vikingo adolecieron de escasa sensibilidad para registrar los seísmos, deducibles del proceso activo de enfriamiento de la litosfera del planeta. Por eso se ha optado por un método indirecto, comparativo, midiendo el deslizamiento de las fallas de superficie o cotejándolo con los datos disponibles de los seísmos lunares. La frecuencia de los temblores, se concluye, es algo inferior a la de los terremotos.

Postula el neodarwinismo que las mutaciones aleatorias crean la variabilidad de los organismos, las diferencias genéticas sobre las que actúa la selección primando los alelos más eficaces. Pero la tesis de partida empieza a ver tambalearse su base: hay organismos (bacterias y levaduras) donde las mutaciones no son casuales sino que están dirigidas. ¿Cómo ajustar ese fenómeno dentro de la teoría evolutiva dominante?

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



QUIMICA DE LA COMUNICACION CEREBRAL, por Jean-Pierre Changeux
La interacción de neuromediadores y receptores regula la actividad del cerebro.

LA RESISTENCIA ELECTRICA DE LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA CRITICA, por David J. Bishop, Peter L. Gammel y David A. Huse
Se empieza a vislumbrar cómo interfiere el movimiento de los vórtices magnéticos en el flujo de corriente eléctrica.

DEDOS DE CINC, por Daniela Rhodes y Aaron Klug
Desempeñan un papel fundamental en la regulación de la actividad de los genes de muchas especies, de la levadura al hombre.

¿COMO DEBERIAN PENSAR LOS QUIMICOS?, por Roald Hoffmann
Los químicos pueden crear moléculas naturales con medios que no lo son, o magníficas estructuras nunca vistas anteriormente.

LA TECNOLOGIA DEL ARTE CINETICO, por George Rickley
Tan delicado es el juego de pesos y equilibrios de las esculturas del autor, que el más ligero soplo de viento hace que sus partes bailen.

ASI SE ATRAVIESA LA BARRERA HEMATOENCEFALICA, por Elaine Tuomanen
El desarrollo de una terapia contra la meningitis pone de manifiesto la manera en que las bacterias atraviesan la barrera hematoencefálica.

LA CALCULADORA MECANICA DE CHARLES BABBAGE, por Doron D. Swade
Las construcción efectiva de una calculadora de Babbage de tres toneladas de peso revela cuán injusta se ha mostrado la historia con el pionero de la computación automática.

RADIACION COSMICA DEL FONDO DE MICROONDAS, por J. L. Sanz y E. Martínez-González
Las observaciones realizadas por el satélite COBE confirman la teoría cosmológica de la gran explosión, si bien queda aún por explicar la formación de las galaxias, los cúmulos, los grandes vacíos y otras estructuras.

